

Bachelorarbeit

von Frank Grunewald, SM061w

Thema: Experimentelle Untersuchung eines vorgegebenen Befestigungswinkels aus Aluminium, unter Berücksichtigung verschiedener Einbausituationen im Vergleich zu Berechnungsmodellen

Erstprüfer: Prof. Dr. Ing. Torsten Laufs

Zweitprüfer/-in: Dipl. Ing. Grit Gutschick

Roßwein, Dezember 2010

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Lichtenau, Dezember 2010
Ort, Datum

Unterschrift

	Seite
Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
1 Einführung	10
1.1 Allgemeines	10
1.2 Ziel der Arbeit	11
1.3 Abgrenzung	12
2 Theoretische Grundlagen	14
2.1 Beschreibung der Befestigungswinkel	14
2.1.1 Werkstoff: Aluminiumknetlegierung EN AW-6063 T66	14
2.1.2 Geometrie der zu prüfenden Winkeln	16
2.2 Aspekte zum Versuchsaufbau und –ablauf	17
2.2.1 Vereinfachte, überschlägige Bemessung des Versuchsaufbaus	18
2.2.1.1 Versagen des Grundwerkstoffes	18
2.2.1.2 Durchstanzen der Flanschschraube	19
2.2.2 Auswertung der Rechenergebnisse	20
2.2.3 Beschreibung des Prüfstands im Metallbaulabor Roßwein	21
2.2.4 Aufbau des Prüfstandes bei 90°, 60° und 45° Lasteinleitung	23
2.2.5 Anordnung der Wegaufnehmer	24
2.2.6 Korrekturrechnung	28
2.2.7 Versuchsdurchführung	32
2.2.8 Auswerten der Versuchsergebnisse	33
2.3 Aspekte zur Finite-Elemente-Methode (FEM) im Hinblick auf die programmtechnische Anwendung	37
2.3.1 Allgemeines zu EDV-Programm	37
2.3.2 RFEM4	38
2.3.3 Vorbetrachtung RFEM4	39
2.3.3.1 Eingabe Balkenstab	39
2.3.3.1.1 Geometrie	39
2.3.3.1.2 Werkstoff	43
2.3.3.1.3 Lasten	46
2.3.3.1.4 FE-Netz regenerieren	47
2.3.3.1.5 Weitere Einstellungen	49
2.3.3.2 Untersuchung Balkenmodelle	53
2.3.3.2.1 Flächenmodell	53
2.3.3.2.2 Volumenmodell	56
2.3.3.3 Auswertung und Zusammenfassung Balkenmodelle	58

	Seite
2.3.4 Eingabe der Aluminiumwinkel	61
2.3.4.1 Topologie	61
2.3.4.2 Aspekte zur Lasteintragung	66
2.3.4.3 Lagerung des Winkels	68
2.3.4.4 FE-Netz regenerieren	70
2.3.4.5 Weitere Programmeinstellungen	71
2.3.5 Auswerten der RFEM- Ergebnisse	72
3 Ergebnisse der praktischen Untersuchung	73
3.1 Allgemeines	73
3.2 Krafteinleitung 90°	74
3.2.1 Winkel 120mm hoch, Wandstärke 3mm	74
3.2.2 Winkel 160mm hoch, Wandstärke 3mm	75
3.2.3 Winkel 180mm hoch, Wandstärke 4mm	76
3.2.4 Winkel 210mm hoch, Wandstärke 4mm	77
3.2.5 Winkel 230mm hoch, Wandstärke 4mm	78
3.2.6 Winkel 240mm hoch, Wandstärke 4,5mm	79
3.2.7 Winkel 280mm hoch, Wandstärke 4,5mm	80
3.3 Krafteinleitung 60°	81
3.3.1 Winkel 120mm hoch, Wandstärke 3mm	81
3.3.2 Winkel 160mm hoch, Wandstärke 3mm	82
3.3.3 Winkel 180mm hoch, Wandstärke 4mm	83
3.3.4 Winkel 210mm hoch, Wandstärke 4mm	84
3.3.5 Winkel 230mm hoch, Wandstärke 4mm	85
3.3.6 Winkel 240mm hoch, Wandstärke 4,5mm	86
3.3.7 Winkel 280mm hoch, Wandstärke 4,5mm	87
3.4 Krafteinleitung 45°	88
3.4.1 Winkel 120mm hoch, Wandstärke 3mm	88
3.4.2 Winkel 160mm hoch, Wandstärke 3mm	89
3.4.3 Winkel 180mm hoch, Wandstärke 4mm	90
3.4.4 Winkel 210mm hoch, Wandstärke 4mm	91
3.4.5 Winkel 230mm hoch, Wandstärke 4mm	92
3.4.6 Winkel 240mm hoch, Wandstärke 4,5mm	93
3.4.7 Winkel 280mm hoch, Wandstärke 4,5mm	94
3.5 Auswertung Ergebnisse aus praktischen Versuchen	95

	Seite
4. Ergebnisse mit dem Finiten-Element-Programm Dlubal RFEM4	96
4.1 Ergebnisse Zuglasten 90°	96
4.2 Ergebnisse Zuglasten 60°	98
4.3 Ergebnisse Zuglasten 45°	99
4.4 Auswertung Ergebnisse aus RFEM	100
5 Vergleichende Betrachtungen	101
6 Zusammenfassungen	104
Literaturverzeichnis	107
Danksagung	107
Anhang	108

Abbildungsverzeichnis:	Seite
Abbildung 1: Unterkonstruktion für geklebte Fassadenplatten	10
Abbildung 2: Übersicht Unterkonstruktionen	12
Abbildung 3: Befestigung in der Praxis	13
Abbildung 4: Befestigung am Prüfstand	13
Abbildung 5: Spannungs-Dehnungsdiagramm	15
Abbildung 6: Geometrie der Winkel	16
Abbildung 7: Eckgeometrie	16
Abbildung 8: Aufbau Versuchsstand	17
Abbildung 9: geschwächter Querschnitt	18
Abbildung 9a: Schraubenbild	18
Abbildung 10: Ausreißwinkel 60°	19
Abbildung 11: Ared	19
Abbildung 12: Abzuscherende Fläche	20
Abbildung 13: Skizze Prüfstand	22
Abbildung 14: Detailskizze; Verbindung zwischen Zylinder und Aluminiumwinkel	23
Abbildung 15: Statisches System	23
Abbildung 16: Anordnung Wegaufnehmer	24
Abbildung 17: Hilfswinkel	24
Abbildung 18: Detailskizze Ecke	24
Abbildung 19: Bild Wegaufnehmer 90°	25
Abbildung 20: Skizze Zugkraft 45°	26
Abbildung 21: Anordnung Wegaufnehmer bei 45° und 60°	26
Abbildung 22: Anordnung Wegaufnehmer 45°	27
Abbildung 23: Statisches System ohne Belastung	28
Abbildung 24: Statisches System mit Belastung	28
Abbildung 25: Verformung zwischen Gelenk 1 und 2	28
Abbildung 26: Winkel L120-3 vor und während der Belastung	29
Abbildung 27: Ansicht Punkte A-D	30
Abbildung 28: Detail Wegaufnehmer	30
Abbildung 29: y-Verschiebung Punkt B/C	30
Abbildung 30: Detail Δh	31
Abbildung 31: Detail z-Verschiebung A/D	31
Abbildung 32: Ergebnisübersicht Spider8	33
Abbildung 33: Punkte A-D	34
Abbildung 34: Diagramm L120-3- 90°	36
Abbildung 35: Träger auf 2 Stützen	39
Abbildung 36: Flächenkoordinaten	39
Abbildung 37: Rechteckplatte	40
Abbildung 38: Lager am Flächenmodell	40
Abbildung 39: Volumenkoordinaten	41
Abbildung 40: Rechteckplatte	41
Abbildung 41: Volumenkörper	42
Abbildung 42: Linienlager Volumenmodell	42
Abbildung 43: Materialmodell	43
Abbildung 44: Bi-lineares Modell	45
Abbildung 45: Flächenlast	46
Abbildung 46: Volumenlast	46
Abbildung 47: FE-Netz	47
Abbildung 48: FE-Netz	48

	Seite
Abbildung 49: Lastfälle – Berechnungsparameter	49
Abbildung 50: Optionen – Berechnungsparameter	51
Abbildung 51: Isotropes Materialmodell	58
Abbildung 52: Plastisches Materialmodell	59
Abbildung 53: RFEM Rohwinkel	61
Abbildung 54: Skizze Ecke	62
Abbildung 55: Skizze Ecke	62
Abbildung 56: Verformungsbild	62
Abbildung 57: Skizze Ecke	63
Abbildung 58: Verformungsbild	63
Abbildung 59: Öffnungen	64
Abbildung 60: Materialeinstellung	65
Abbildung 61: Lochleibungsspannung	66
Abbildung 62: Linienlast mit punktuelltem Kraftverlauf	66
Abbildung 63: Linienlast	66
Abbildung 64: Lastwinkel	67
Abbildung 65: Lasteinleitung 60°	67
Abbildung 66: Flächenbettung	68
Abbildung 67: Simulation Schraubverbindung	69
Abbildung 68: FE-Netzverdichtung	70
Abbildung 69: Detail FE-Netz	70
Abbildung 70: Maximale Spannungen	72
Abbildung 71: Maximale Verformungen	72
Abbildung 71a: Detail Winkel	73
Abbildung 72: Diagramm L120-3-90°	74
Abbildung 73: Diagramm L160-3-90°	75
Abbildung 74: Diagramm L180-4-90°	76
Abbildung 75: Diagramm L210-4-90°	77
Abbildung 76: Diagramm L230-4-90°	78
Abbildung 77: Diagramm L240-4,5-90°	79
Abbildung 78: Diagramm L280-4,5-90°	80
Abbildung 79: Diagramm L120-3-60°	81
Abbildung 80: Diagramm L160-3-60°	82
Abbildung 81: Diagramm L180-4-60°	83
Abbildung 82: Diagramm L210-4-60°	84
Abbildung 83: Diagramm L230-4-60°	85
Abbildung 84: Diagramm L240-4,5-60°	86
Abbildung 85: Diagramm L280-4,5-60°	87
Abbildung 86: Diagramm L120-3-45°	88
Abbildung 87: Diagramm L160-3-45°	89
Abbildung 88: Diagramm L180-4-45°	90
Abbildung 89: Diagramm L210-4-45°	91
Abbildung 90: Diagramm L230-4-45°	92
Abbildung 91: Diagramm L240-4,5-45°	93
Abbildung 92: Diagramm L280-4,5-45°	94
Abbildung 93: Verformungsbilder	101
Abbildung 94: Diagramm zur Ermittlung der 5%-Fraktilgrenzen	105
Abbildung 95: Übersichtsdiagramm 5%-Fraktilgrenzen beim Wandbock 120-3	106

Tabellenverzeichnis:	Seite
Tabelle 1: Übersicht Verbindungsmittel	13
Tabelle 2: Werkstoffeigenschaften	14
Tabelle 3: Übersicht der Winkel	16
Tabelle 4: Übersicht Messbereiche	21
Tabelle 5: Korrekturrechnung	31
Tabelle 6: Anzahl der Versuche	32
Tabelle 7: Korrekturrechnung	34
Tabelle 8: Übersicht Durchschnitte	35
Tabelle 9: Anfangswerte Diagramm L120-3-90°	36
Tabelle 10: Flächenkoordinaten	39
Tabelle 11: Volumenkoordinaten	41
Tabelle 12: Lasten	46
Tabelle 13: Ergebnisse Balkenmodell	47
Tabelle 14: Ergebnisse Balkenmodell	48
Tabelle 15: Ergebnisse Flächenlast 10 kN/m	53
Tabelle 16: Ergebnisse Flächenlast 26,66 kN/m	54
Tabelle 17: Ergebnisse Flächenlast 32 kN/m	54
Tabelle 18: Ergebnisse Flächenlast 40 kN/m	55
Tabelle 19: Ergebnisse Volumenlast 1000 kN/m ²	56
Tabelle 20: Ergebnisse Volumenlast 2660 kN/m ²	56
Tabelle 21: Ergebnisse Volumenlast 3200 kN/m ²	57
Tabelle 22: Ergebnisse Volumenlast 4000 kN/m ²	57
Tabelle 23: Punktkoordinaten	61
Tabelle 24: Zugkraftanteile	67
Tabelle 25: Orientierungswerte	68
Tabelle 26: Anfangswerte Diagramm L120-3-90°	74
Tabelle 27: Anfangswerte Diagramm L160-3-90°	75
Tabelle 28: Anfangswerte Diagramm L180-4-90°	76
Tabelle 29: Anfangswerte Diagramm L210-4-90°	77
Tabelle 30: Anfangswerte Diagramm L230-4-90°	78
Tabelle 31: Anfangswerte Diagramm L240-4,5-90°	79
Tabelle 32: Anfangswerte Diagramm L280-4,5-90°	80
Tabelle 33: Anfangswerte Diagramm L120-3-60°	81
Tabelle 34: Anfangswerte Diagramm L160-3-60°	82
Tabelle 35: Anfangswerte Diagramm L180-4-60°	83
Tabelle 36: Anfangswerte Diagramm L210-4-60°	84
Tabelle 37: Anfangswerte Diagramm L230-4-60°	85
Tabelle 38: Anfangswerte Diagramm L240-4,5-60°	86
Tabelle 39: Anfangswerte Diagramm L280-4,5-60°	87
Tabelle 40: Anfangswerte Diagramm L120-3-45°	88
Tabelle 41: Anfangswerte Diagramm L160-3-45°	89
Tabelle 42: Anfangswerte Diagramm L180-4-45°	90
Tabelle 43: Anfangswerte Diagramm L210-4-45°	91
Tabelle 44: Anfangswerte Diagramm L230-4-45°	92
Tabelle 45: Anfangswerte Diagramm L240-4,5-45°	93
Tabelle 46: Anfangswerte Diagramm L280-4,5-45°	94
Tabelle 47: Ergebnisse RFEM L120-3-90°	96
Tabelle 48: Ergebnisse RFEM L160-3-90°	96
Tabelle 49: Ergebnisse RFEM L180-4-90°	96

	Seite
Tabelle 50: Ergebnisse RFEM L210-4-90°	96
Tabelle 51: Ergebnisse RFEM L230-4-90°	96
Tabelle 52: Ergebnisse RFEM L240-4,5-90°	97
Tabelle 53: Ergebnisse RFEM L280-4,5-90°	97
Tabelle 54: Ergebnisse RFEM L120-3-60°	98
Tabelle 55: Ergebnisse RFEM L160-3-60°	98
Tabelle 56: Ergebnisse RFEM L180-4-60°	98
Tabelle 57: Ergebnisse RFEM L210-4-60°	98
Tabelle 58: Ergebnisse RFEM L230-4-60°	98
Tabelle 59: Ergebnisse RFEM L240-4,5-60°	98
Tabelle 60: Ergebnisse RFEM L280-4,5-60°	98
Tabelle 61: Ergebnisse RFEM L120-3-45°	99
Tabelle 62: Ergebnisse RFEM L160-3-45°	99
Tabelle 63: Ergebnisse RFEM L180-4-45°	99
Tabelle 64: Ergebnisse RFEM L210-4-45°	99
Tabelle 65: Ergebnisse RFEM L230-4-45°	99
Tabelle 66: Ergebnisse RFEM L240-4,5-45°	99
Tabelle 67: Ergebnisse RFEM L240-4,5-45°	99
Tabelle 68: Zugkräfte aus Berechnungen mit RFEM4	100
Tabelle 69: Verformungsvergleich L120-3	101
Tabelle 70: Verformungsvergleich L160-3	101
Tabelle 71: Verformungsvergleich L180-4	102
Tabelle 72: Verformungsvergleich L210-4	102
Tabelle 73: Verformungsvergleich L230-4	102
Tabelle 74: Verformungsvergleich L240-4,5	102
Tabelle 75: Verformungsvergleich L280-4,5	103
Tabelle 76: Zugkräfte aus Berechnungen mit RFEM4	104

1 Einführung

1.1 Allgemeines

Das Thema der Bachelorarbeit ist durch die Zusammenarbeit der Firma Systea® und der Hochschule Mittweida/Roßwein entstanden. Die Firma Systea® beschäftigt sich seit mehr als 30 Jahren mit der Entwicklung und Herstellung von Unterkonstruktionssystemen für vorgehängte, hinterlüftete Fassaden mit den unterschiedlichsten Materialien und Befestigungsarten. Die Firma Systea® unterscheidet die Systeme nach Ihrer Art der Befestigung der Bekleidungselemente. Es untergliedert sich in sichtbare und verdeckte Befestigung. Als Verbindungselemente kommen in der Regel Aluminium- und Edelstahllegierungen zum Einsatz. Diese Konstruktionsbauteile sind wegen ihrer Korrosionsbeständigkeit und Wartungsfreiheit für witterungsbeständige Bauelemente geeignet. Hauptsächlich bestehen alle Unterkonstruktionssysteme aus stranggepressten Aluminiumprofilen in der Legierung EN AW – 6063 T66. Der Grund für diese Legierung sind die maximal erreichbaren Zugfestigkeiten bei stranggepressten Profilen.

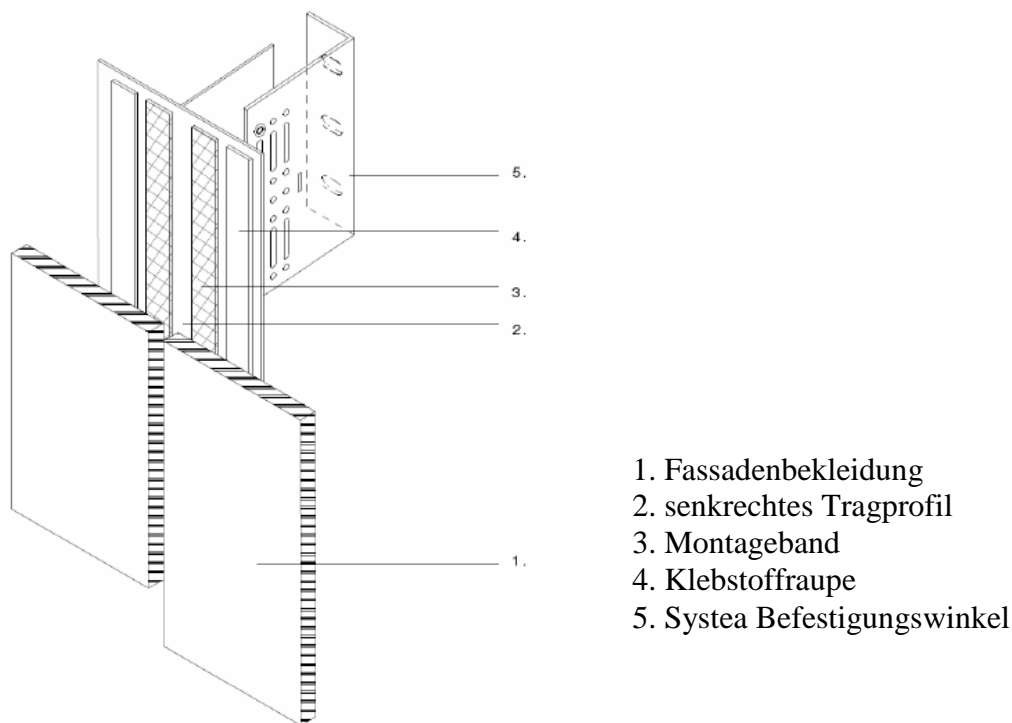


Abbildung 1: Unterkonstruktion für geklebte Fassadenplatten

Der Befestigungswinkel wird bei allen Unterkonstruktionen verwendet und wie im Bild 1 eingesetzt. Für alle Unterkonstruktionssysteme erstellt die Firma Systea® auf Kundenwunsch objektbezogene statische Berechnungen sowie Verlegepläne nach DIN 18516-1:2010-06 (Stand sicherheitsnachweis). Demnach muss Bekleidung, Unterkonstruktion und Befestigungsmittel aufeinander abgestimmt und zugelassen sein. Es können zum Beispiel nicht beliebige Materialien miteinander kombiniert werden. Die Unterkonstruktion muss das Eigengewicht der Außenhülle, Windlasten und alle in der Planung erfassten Anschlüsse (z.B. Sonnenschutz, Putzbalkone) sicher an das Gebäude abführen.

Im speziellen geht es in dieser Arbeit um die Untersuchung der Befestigungswinkel.

1.2 Ziel der Arbeit

Als Unterkonstruktion werden bei der Firma Systea stranggepresste Befestigungswinkel aus Aluminiumknetlegierung EN AW – 6063 T66 eingesetzt. Um Unregelmäßigkeiten im Bauwerk oder unterschiedliche Dämmstärken ausgleichen zu können, werden die Befestigungswinkel in verschiedenen abgestuften Größen angefertigt und montiert.

Ziel der Arbeit ist, fehlendes oder mangelhaftes Wissen über diese vorgegebenen Befestigungswinkel zu gewinnen und mit möglichen Rechenmodellen abzugleichen. Zusätzlich werden die Trag- und Verformungseigenschaften der verschiedenen Winkelgrößen ermittelt, um für den konkreten Anwendungsfall Nachweise führen zu können, als Hilfsmittel für den Planer.

In der nachfolgenden Bachelorarbeit werden die Befestigungswinkel, unter verschiedenen Lastangriffswinkeln, experimentell an einem Prüfstand untersucht. Aufgrund der Auswahl der durchgeführten Versuche, von mindestens 3 je Winkelgröße, soll eine statistische Auswertbarkeit erreicht werden, die jedoch nur bedingt für die praktische Anwendung ausreichend ist.

Um die Werte der praktischen Versuche vergleichen zu können, werden diese Versuche mit Hilfe eines FEM – Programms simuliert und die Verformungswerte gegenüber gestellt.

1.3 Abgrenzung

In der Praxis gibt es verschiedene Varianten der Montage, des Weiteren sind die Untergründe nicht eben und gleichmäßig. Toleranzen im Mauerwerk oder Beton, die in der Praxis vorkommen, werden in den Versuchen nicht berücksichtigt. Für die Auswertung der experimentellen Versuche stellt die Befestigung zum Untergrund die Schnittstelle dar. Der Untergrund wird als unendlich steif und eben angesetzt. Im Versuch wird das mit einer massiven Stahlunterkonstruktion gewährleistet, die fest am Prüfstand verschraubt ist und wiederum den Befestigungswinkel in seiner Ausgangslage hält. In Absprache mit der Firma Systea wurde festgelegt, die Prüfkraft in 3 verschiedenen Lastangriffswinkeln auf den Befestigungswinkel einwirken zu lassen. Dies geschieht in einem Winkel von 90° , 45° und 60° (siehe Abbildung 2)

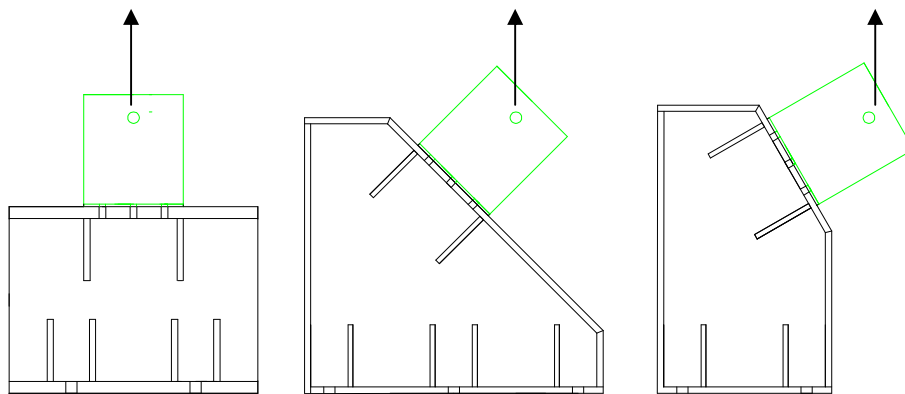


Abbildung 2: Übersicht Unterkonstruktionen

Der Befestigungswinkel wird nur auf sein Verhalten bei Zugkräften untersucht. Diese Zugkräfte entstehen in der Praxis durch Windsog, Eigengewicht der Vorhangsfassade oder durch Installationslasten. Druckkräfte infolge Winddruck werden in den Versuchen nicht angesetzt und nicht berücksichtigt.

Die Kräfte wirken als kurzzeitige Zugbelastung, es werden keine Langzeiteinwirkungen oder dynamische Einwirkungen untersucht. Das Kriechverhalten von Aluminium wird nicht berücksichtigt.

Auf die Temperaturunterschiede in den Einsatzgebieten der Winkel kann bei den Versuchen kein Einfluss genommen werden. Der Versuch wird bei Raumtemperatur des Labors durchgeführt werden. Im Labor liegt die Temperatur zwischen $15-17^\circ\text{C}$.

In der Praxis wird der Befestigungswinkel wie folgt befestigt:

Untergrund	Befestigungsmittel
Beton/Mauerwerk	Kunststoffdübel von Fischer: - SXS 10/60 FUS - FUR 10/80 FUS
Profilstahl	Bohrschraube EJOT JT3-12-5,5x78E16 oder mit einer Gewindefurchenden Schraube EJOT JZ3-6,3x25E22/3
Trapezprofil	Bohrschraube EJOT-6,5x19E16/3

Tabelle 1: Übersicht Verbindungsmittel

Da in den häufigsten Fällen die Montage mit Kunststoffdübeln in Beton angewendet wird, werden die Dübel SXS 10/60 FUS und FUR 10/80 FUS simuliert. Der Dübel selbst wird in dieser Versuchsreihe nicht geprüft. Statt der Verankerung des Befestigungswinkels im Beton, wird der Winkel mit zwei M10 Sechskantschraube mit 20mm Unterlegscheiben an die Stahlunterkonstruktion des Prüfstandes angeschlossen. Die Kunststoffhülse, die in der Praxis als Korrosionsschutz und Isolator dient, wird vernachlässigt.

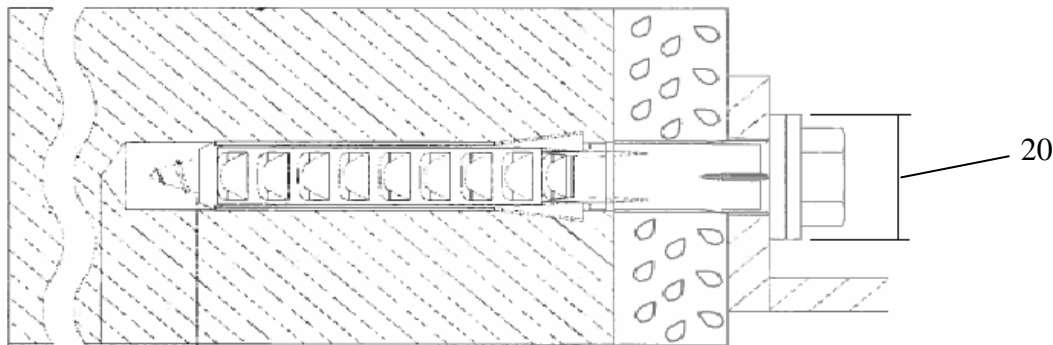
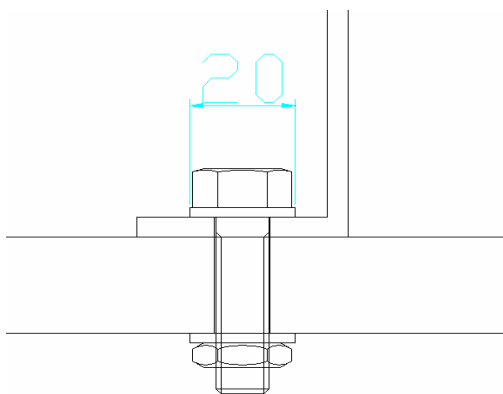


Abbildung 3: Befestigung in der Praxis



Die Schraubendehnung wird in den Versuchen als unendlich steif angenommen

Abbildung 4: Befestigung am Prüfstand

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Beschreibung der Befestigungswinkel

2.1.1 Werkstoff: Aluminiumknetlegierung EN AW – 6063 T66

Die Befestigungswinkel sind stranggepresste Profile. Vorteil des Strangpressens ist, Profile auch mit komplizierten, scharfkantigen Formen herzustellen. Der hohe, in einem Verfahrensschritt erreichbare Umformgrad und die geringen Werkzeugkosten gestalten das Strangpressen vor allem für die Fertigung relativ geringer Lose am wirtschaftlichsten. Der Werkstoff EN AW – 6063 T66 ist eine Aluminiumknetlegierung mit den Legierungselementen Magnesium(0,45-0,9%), Silizium(0,2-0,6%), Eisen(0,35%), Kupfer(0,1%), Mangan(0,1%), Chrom(0,1%), Zink(0,1%) und Titan(0,1%). Zwei Legierungselemente beeinflussen die Eigenschaften erheblich. Magnesium verbessert die Warmfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit von Aluminium, verschlechtert aber die Gießbarkeit und Schmelzbarkeit. Silizium wiederum verbessert die Gießeigenschaften und die mechanischen Festigkeitseigenschaften. Diese Legierung ist aushärtbar und wurde warmausgelagert. Die alte Bezeichnung für diese Legierung ist AlMgSi0,7 F25.

Dieser Werkstoff hat eine Zugfestigkeit R_m von $245 \frac{N}{mm^2}$.

Beim Strangpressen ist die Festigkeit des Materials Aluminium auf eine Zugfestigkeit von etwa 250 N/mm² begrenzt, da Aluminiumlegierungen in höherer Qualität zu große Risiken bei der Herstellung im Strangpressverfahren bergen. Gefahr: Werkzeugbruch infolge ungünstiger Fließeigenschaften.

Die wichtigsten Eigenschaften sind:

Zugfestigkeit R_m	$245 \frac{N}{mm^2}$
0,2% Dehngrenze $R_{P0,2}$	$200 \frac{N}{mm^2}$
E-Modul	$69000 \frac{N}{mm^2}$
Dichte	$2,7 \frac{g}{cm^3}$
Wärmeausdehnungskoeffizient bei 20-200°C	$23,4 \cdot 10^{-6} K$
Wärmeleitfähigkeit	$190-220 \frac{W}{K \cdot m}$
Elektrische Leitfähigkeit bei 20°C	$28-34 \frac{Ms}{m}$

Tabelle 2: Werkstoffeigenschaften

Das Spannungs-Dehnungsdiagramm von Aluminium

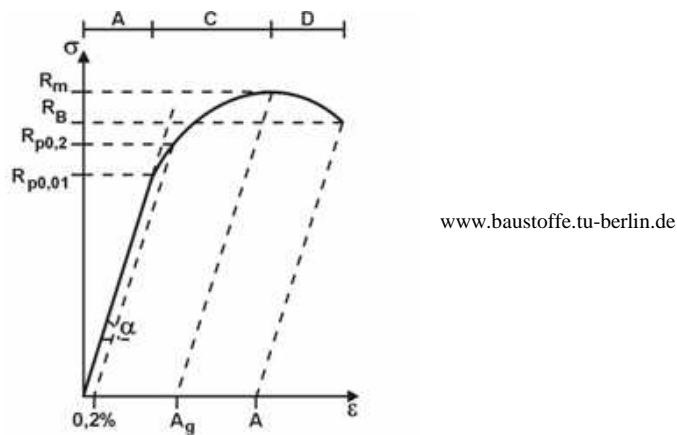


Abbildung 5: Spannungs-Dehnungsdiagramm

Der stark ansteigende Bereich zu Beginn beschreibt den elastischen Bereich der Verformung (Bereich A). Der Anstieg der Geraden entspricht dem Elastizitätsmodul E , das heißt der Steifigkeit des Werkstoffes. Sobald der Verlauf von der Geraden abweicht, beginnt die plastische Verformung. Dieser Übergang ist fließend und wird als 0,2% Dehnung definiert. Der Spannungswert an dieser Stelle wird als Dehngrenze $R_{p0,2}$ bezeichnet.

Im weiteren Verlauf steigt die Spannung weiter an, bis am höchsten Punkt die Maximalkraft F_{max} erreicht wird (plastisch-verfestigendes Verhalten; Bereich B). Der dazugehörige Spannungswert wird als Zugfestigkeit R_m bezeichnet. Bis zu diesem Zeitpunkt verformt sich der Werkstoff recht gleichmäßig, deshalb wird die Dehnung bis zur Zugfestigkeit als Gleichmaßdehnung A_g bezeichnet. Danach fällt die Spannung ab, da es an geschwächten Stellen des Werkstoffes durch Einschnürung zu Querschnittsreduzierungen kommt (Bereich C). Dieser Bereich wird Einschnürdehnung genannt.

2.1.2 Geometrie der zu prüfenden Winkel

Höhe der Winkel	Anzahl	Wandstärke
120	15	3mm
160	15	3mm
180	15	4mm
210	15	4mm
230	15	4mm
240	15	4,5mm
280	15	4,5mm

Tabelle 3: Übersicht der Winkel

Die Anzahl setzt sich zusammen aus: -5 Versuche je Lastangriff
-3 Lastangriffswinkel

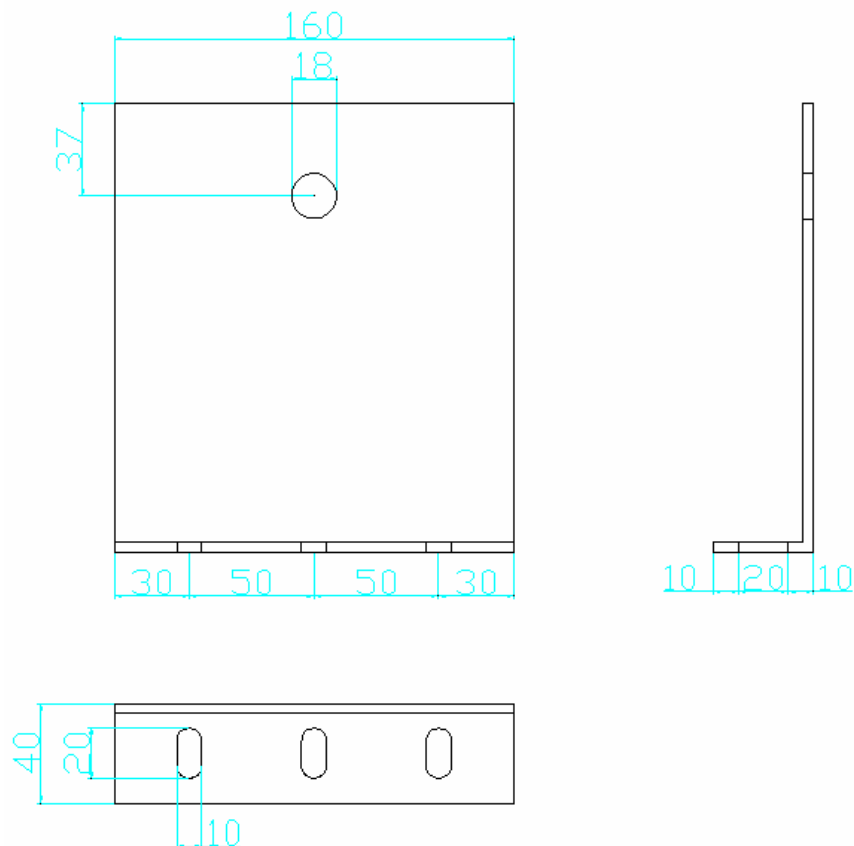
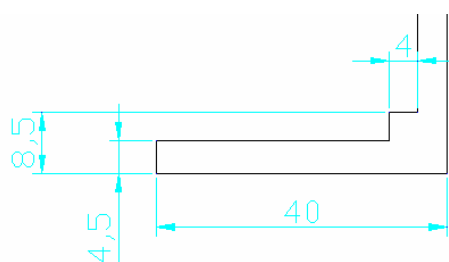


Abbildung 6: Geometrie der Winkel

Alle Winkel sind in der Breite gleich. Die Anordnung der Langlöcher ist bei allen Winkeln gleich. Die Winkel variieren nur in der Höhe und in der Wandstärke. Das eingestanzte Loch mit einem Durchmesser von 18mm ist immer 37mm von der Oberkante des Winkels eingebracht.



- Die Winkel mit einer Höhe von 240mm und 280mm haben in der Ecke noch eine zusätzliche Verstärkung

Abbildung 7: Eckgeometrie

2.2 Aspekte zum Versuchsaufbau und -ablauf

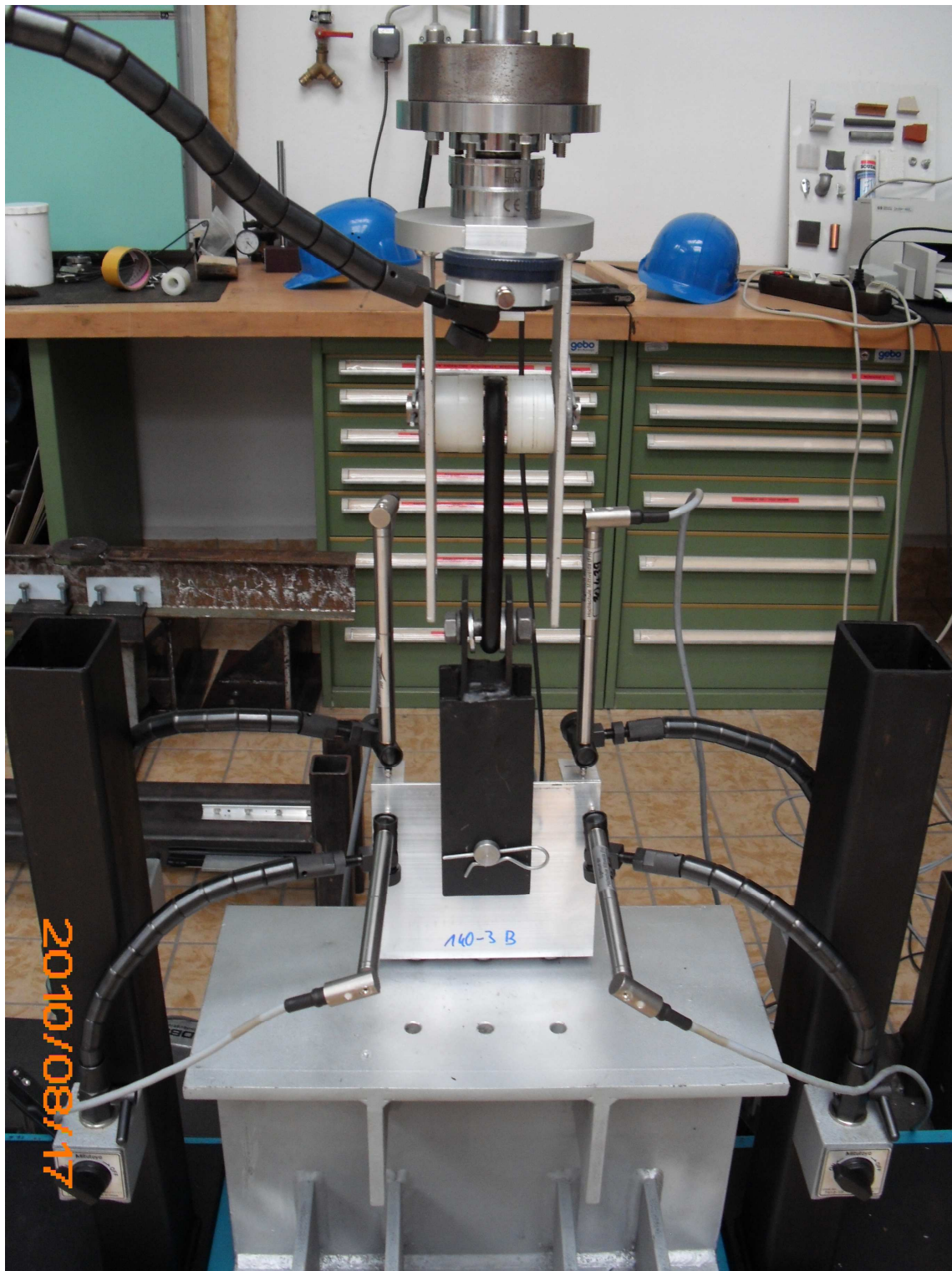


Abbildung 8: Aufbau Versuchsstand

2.2.1 Vereinfachte, überschlägige Bemessung des Versuchsaufbaus

Um die maximal zu erwartenden Kräfte am Prüfstand einschätzen zu können, werden vereinfachte Versagensberechnungen durchgeführt. Wird die Zugkraft senkrecht auf den Winkel aufgebracht, wird die größte Kraft benötigt, um den Winkel dauerhaft zu verformen, da der Winkel mittig und dadurch beide Schrauben gleichmäßig belastet werden (siehe Bild 9). Der Aufbau des Prüfstandes muss so konstruiert werden, dass diese Kräfte in jedem Fall aufgebracht werden können.

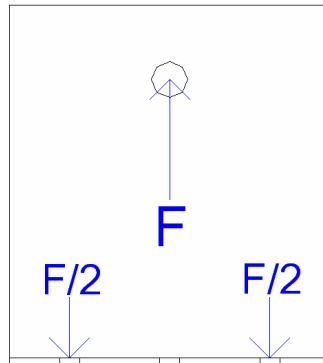


Abbildung 9: Schraubenbild

2.2.1.1 Versagen des Grundwerkstoffes

a) Versagen des Grundwerkstoffes am geschwächten Querschnitt

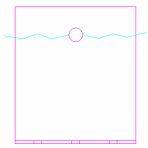


Abbildung 9a: Risslinie geschwächter Querschnitt

Berechnung nach EC9

- **allgemeines Fließen des Bauteils:** $N_{O,Rd} = A_g * \frac{f_o}{\gamma_{M1}}$

$$A_g = 16\text{cm} * 0,4\text{cm} = 6,4\text{cm}^2$$

$$N_{O,Rd} = 6,4\text{cm}^2 * \frac{20\text{kN}}{1,1\text{cm}^2}$$

$$f_o = 20 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

$$N_{O,Rd} \equiv \underline{\underline{116\text{kN}}}$$

- **örtliches Versagen in einem kritischen Querschnitt:** $N_{U,Rd} = 0,9 * A_{net} * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$

$$A_{net} = A_g - 1,85 * 0,4 = 5,66 \text{ cm}^2$$

$$f_u = 24,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$N_{U,Rd} = 0,9 * 5,66\text{cm}^2 * \frac{24,5\text{kN}}{1,25\text{cm}^2}$$

$$N_{U,Rd} \equiv \underline{\underline{100\text{kN}}}$$

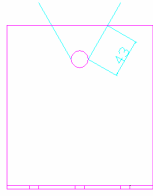
b) Versagen des Grundwerkstoffes mit Ausreißwinkel 60°

Abbildung 10: Risslinie Ausreißwinkel 60°

Berechnung nach EC9

allgemeines Fließen des Bauteils: $N_{O,Rd} = A_g * \frac{f_o}{\gamma_{M1}}$

$$A_g = 2 * 4,3 \text{ cm} * 0,4 \text{ cm} = 3,44 \text{ cm}^2 \quad N_{O,Rd} = 3,44 \text{ cm}^2 * \frac{20 \text{ kN}}{1,1 \text{ cm}^2}$$

$$f_o = 20 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

$$N_{O,Rd} = \underline{\underline{62 \text{ kN}}}$$

2.2.1.2 Durchstanzen der Befestigungsschraube nach EC9**a) Durchstanzen der Befestigungsschraube nach EC9**

-vereinfacht ohne Langloch

$$B_{p,Rd} = 0,6 * \pi * d_m * t_p * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

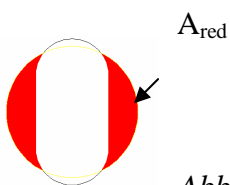
$$t_p = 0,45 \text{ cm}$$

$$d_m = 2 \text{ cm}$$

$$B_{p,Rd} = 0,6 * \pi * 2 \text{ cm} * 0,45 \text{ cm} * \frac{24,5 \text{ kN}}{1,25 \text{ cm}^2}$$

$$B_{p,Rd} = \underline{\underline{33 \text{ kN pro Schraube}}}$$

Dieses Ergebnis bezieht sich auf die komplette Fläche der Flanschschraube! Wird das Langloch mit einbezogen und die Flächen ins Verhältnis zur Kraft gesetzt, ergibt sich eine Kraft von 13 kN pro Schraube.

Abbildung 11: A_{red}

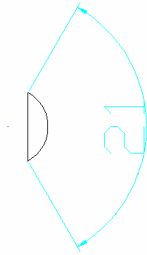
$$\frac{A}{A_{red}} = \frac{B_{p,Rd}}{B_{red}}$$

$$A = \pi * r^2 = 3,14 \text{ cm}^2$$

$$A_{red} \approx 1,35 \text{ cm}^2$$

$$B_{red} = \frac{B_{p,Rd} * A_{red}}{A}$$

$$B_{red} = \underline{\underline{14 \text{ kN pro Schraube}}}$$

b) Durchstanzen der Flanschschraube durch Abscheren nach DIN*Abbildung 12: Abzuscherende Fläche*

Abzuscherende Fläche: $A = u_s \cdot t_{Al}$

$u_s = 2 \cdot \text{Bogenlänge Bild ?}$

$$A = 1,89 \text{ cm}^2$$

Zulässige Abscherkraft: $N_{zul} = \tau_{Hz} \cdot A$

$$\tau_{Hz} = 7 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$N_{zul} = 7 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 1,89 \text{ cm}^2$$

$$N_{zul} = \underline{\underline{13 \text{ kN pro Schraube}}}$$

2.2.2 Auswertung der Rechenergebnisse

Um den Winkel L280-4,5 zum Versagen zu bringen, muss eine Zugkraft von mind. $2 \times N_{\min}$ aufgebracht werden. Der Aufbau des Prüfstandes wurde so konstruiert, dass eine Zugkraft von mindestens 26kN übertragen werden kann. Beim Winkel L120-3 ist $2 \times N_{\min} = 17,5 \text{ kN}$ und beim Winkel L180-4 ist $2 \times N_{\min} = 23,5 \text{ kN}$.

2.2.3 Beschreibung des Prüfstandes im Metallbaulabor

Der Rahmen des Prüfstandes im Metallbaulabor in Roßwein besteht aus HEB 300 Profilen. Mit einer Breite von 3000mm und einer maximalen Höhe von 3000mm können auch relativ große Bauteile geprüft werden. Der obere Rahmenträger ist höhenverstellbar, um einen größeren Messbereich zu ermöglichen. Am oberen Träger ist mittig ein Zylinder angeschraubt, der je nach Bedarf durch eine Handpumpe Zug- oder Druckkräfte aufbringen kann. Maximale Druckkraft des Zylinders liegt bei 100kN, maximale Zugkraft bei 45kN. Um eine genaue digitale Aufzeichnung von den Versuchen zu gewährleisten, gibt es am Versuchsstand einen PC-Arbeitsplatz mit einem Spider8 von der Firma HBM. Der Spider8 ist PC-Messelektronik für das elektrische Messen mechanischer Größen wie Dehnungen, Kräfte, Drücke, Wege, Beschleunigungen und für Temperaturen.

Die gesamte Signalkonditionierung -Speisung für passive Aufnehmer und Verstärkung, Digitalisierung, Rechnerinterface und Anschlusstechnik für maximal 8 Kanäle –ist in einem Gehäuse vereinigt.

Der Spider8 wird über den Druckeranschluss oder eine RS-232-Schnittstelle an den Rechner angeschlossen und ist sofort einsatzbereit.

Um die Kräfte messen zu können, sind zwei Kraftmessdosen vorhanden. Die größere Kraftmessdose hat einen Messbereich bis maximal 50kN. Ebenfalls sind 4 Wegeaufnehmer vorhanden, um Verformungen sofort graphisch darstellen zu können. Zur Kontrolle können auch mehrere analoge Wegmessuhren angebaut werden.

Typ	Messbereich
Kraftmessdose U93/50kN	bis max. 50 kN
Wegaufnehmer 1	bis max. 20 mm
Wegaufnehmer 2	bis max. 20 mm
Wegaufnehmer 3	bis max. 20 mm
Wegaufnehmer 4	bis max. 20 mm

Tabelle 4: Übersicht Messbereiche

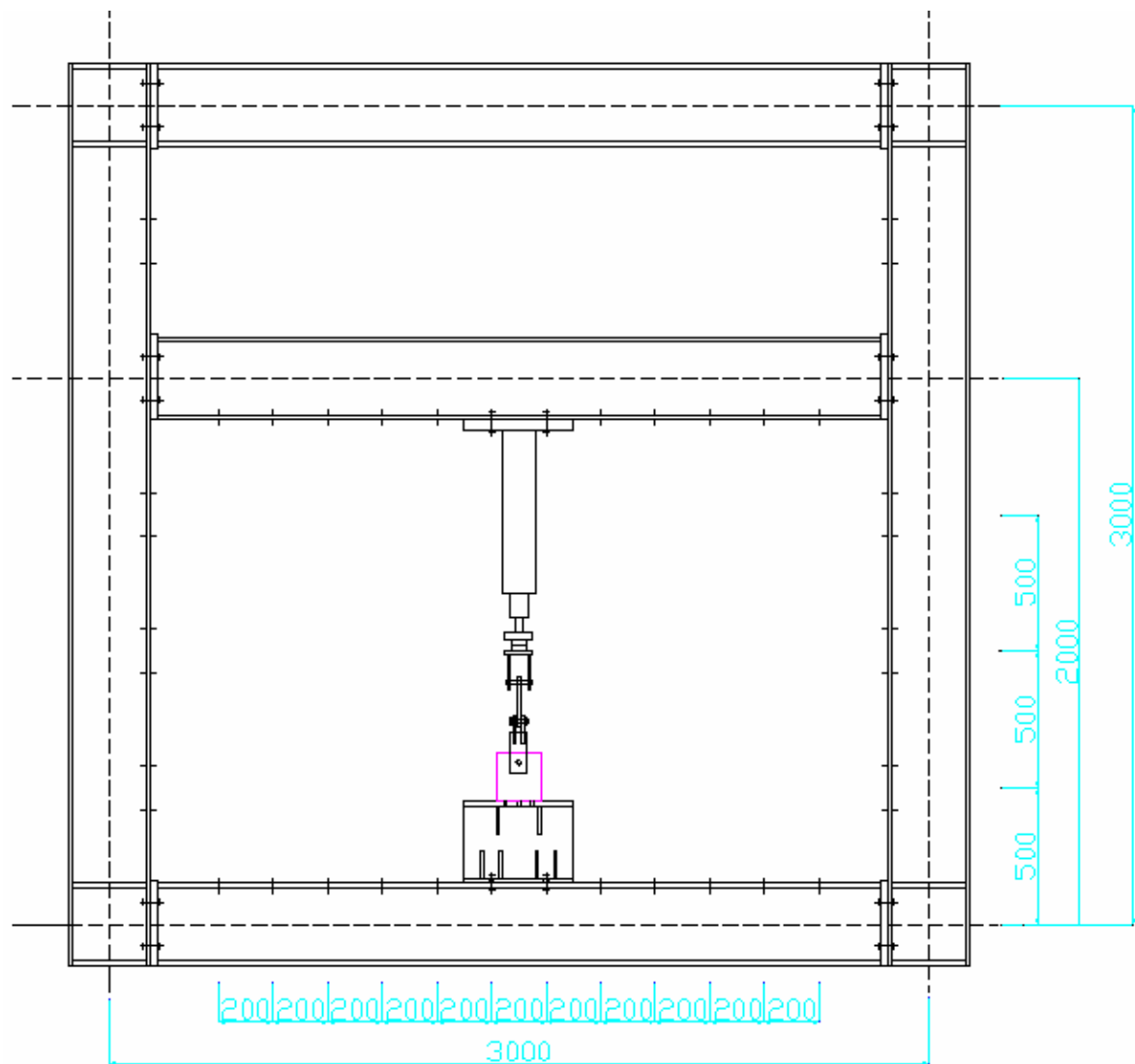


Abbildung 13: Skizze Prüfstand

2.2.4 Aufbau des Prüfstandes bei 90°, 60° und 45° Lasteinleitung

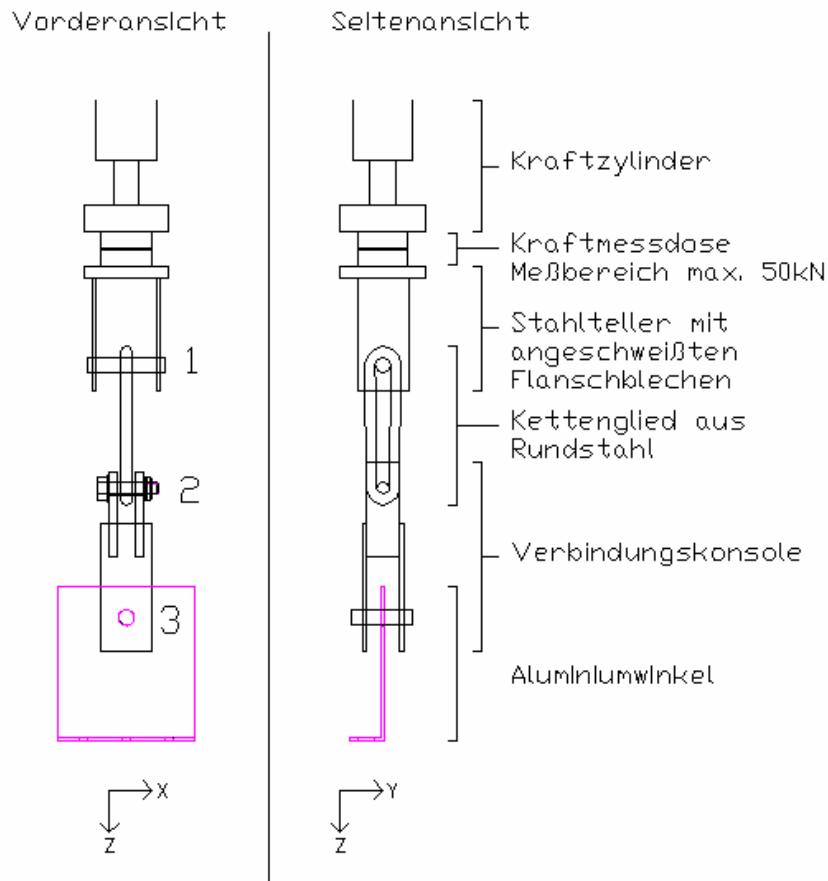


Abbildung 14: Detailskizze; Verbindung zwischen Zylinder und Aluminiumwinkel

Hauptproblem beim Aufbau des Prüfstandes ist, dass in die Kraftmessdose keinesfalls Momente eingeleitet werden dürfen. Wirksame Momente würden zum Zerstören der Messdose führen. Bei Belastung kann vor den Versuchen schon erkannt werden, dass sich bei der Verformung der Winkel eine Außermittigkeit ergibt.

Der Hydraulikzylinder ist biegesteif am Rahmen des Prüfstandes angeschlossen. Am Zylinder ist die Kraftmessdose mit 8 hochfesten Edelstahlschrauben nach Herstellerangaben angeschraubt. Die gleiche Verbindung besteht zwischen der Kraftmessdose und dem Stahlteiler mit angeschweißten Flanschblechen. Diese Verbindung wird ebenfalls als biegesteif angenommen. Um keine Momente auf die Kraftmessdose einwirken zu lassen, wurde ein Kettenglied eingebaut. Das Kettenglied wurde aus Rundstahl mit einem Durchmesser 12mm gefertigt. Es hängt zwischen einem Bolzen oben (Durchmesser 18mm) und einer M14 Schachtschraube unten. Diese Verbindungen sind als gelenkig anzusehen. Die Verbindungskonsole ist gelenkig oben am Kettenglied bzw. unten am Aluminiumwinkel befestigt. Daraus ergibt sich folgendes statisches System:

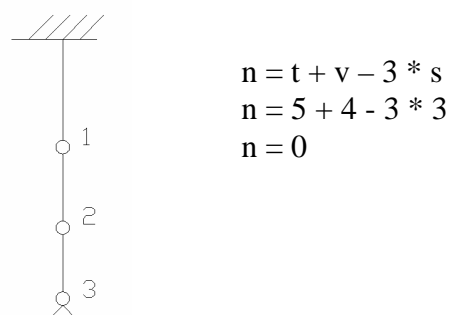


Abbildung 15: Statische System

2.2.5 Anordnung der Wegaufnehmer

Darstellung der Verformungen bei 90° Krafteinleitung

Die Anordnung der Wegaufnehmer wurde so gewählt, dass Korrekturrechnungen und Verformungsanalysen getroffen werden können.

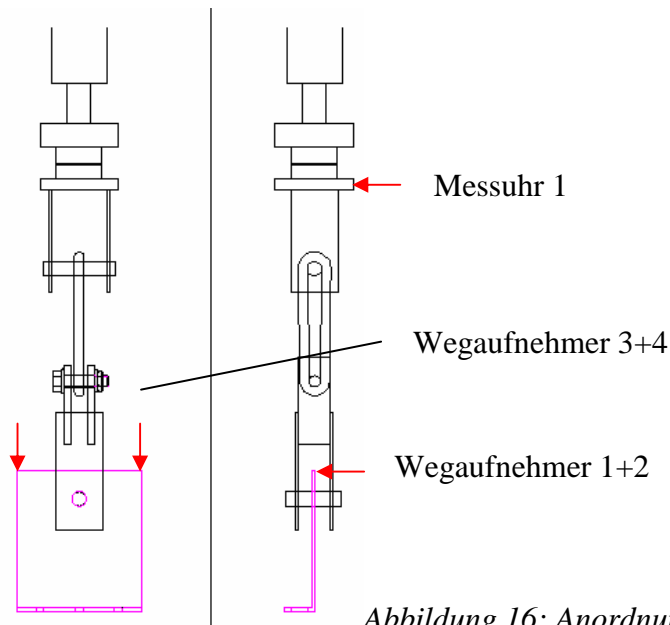


Abbildung 16: Anordnung Wegaufnehmer

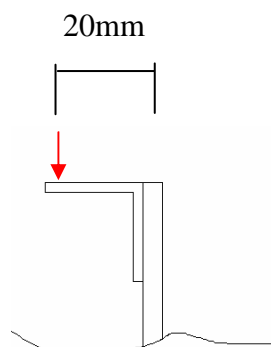


Abbildung 17: Hilfswinkel

Wegaufnehmer 3 und 4 messen die Verformung der Winkel in z-Richtung. Zur Kontrolle werden beide oberen Ecken der Winkel gemessen. Theoretisch sind beide Verformungen gleich. Durch die Verformung in y-Richtung bei Belastung wird ein kleiner aufgeklebter Winkel zur Hilfe genommen. Somit kann der Wegaufnehmer während der Messung auf dem Hilfswinkel „wandern“ (Abbildung 17).

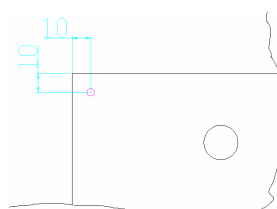


Abbildung 18: Detailskizze Ecke

Wegaufnehmer 1 und 2 messen die Verformung in y-Richtung. So wie in Abbildung 18 werden die Wegaufnehmer links und rechts am Winkel angeordnet. Messuhr 1 wird während der einzelnen Prüfstufen abgelesen. Diese Werte werden für die Korrekturrechnung der realen Zugkräfte benötigt.



Abbildung 19: Bild Wegaufnehmer 90°

Darstellung der Verformungen bei 60° und 45° Krafteinleitung

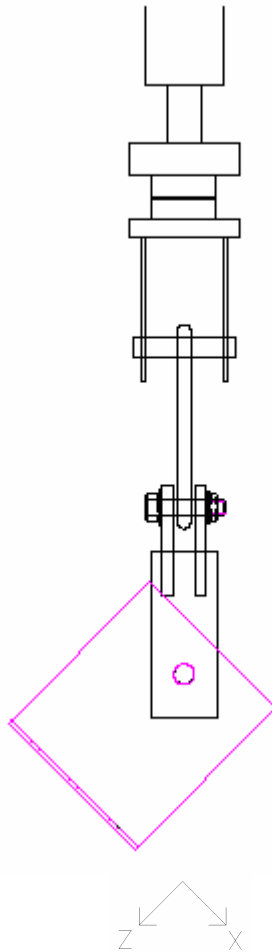


Abbildung 20: Skizze Zugkraft 45°

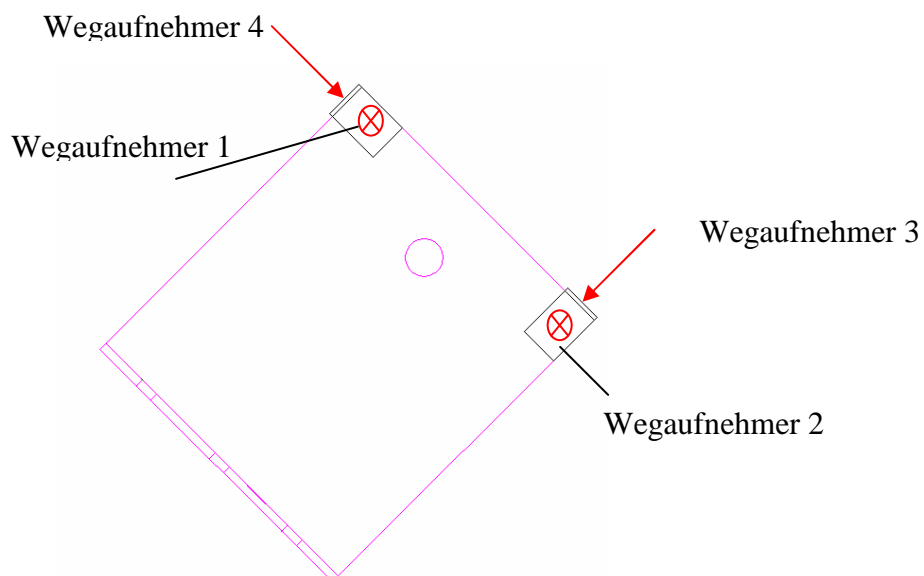


Abbildung 21: Anordnung Wegaufnehmer bei 45° und 60°



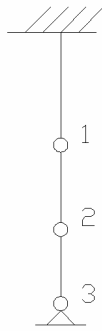
Abbildung 22: Anordnung Wegaufnehmer 45°

2.2.6 Korrekturrechnung

a) Korrekturrechnung der realen Zugkräfte

Bei der Belastung durch Hydraulik Zylinder wirken auf die Kraftmessdose über die eingebauten Gelenke eine Zugkraft und eine Querkraft. Allerdings zeigt die Kraftmessdose nur die reinen Zugkräfte an, somit muss unter Einbeziehung der Verformung eine Korrekturrechnung durchgeführt werden.

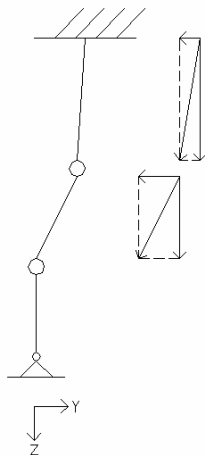
Ausgangssituation:



Es wirken weder Zug- noch Querkräfte. Es sind keine Verformungen vorhanden.

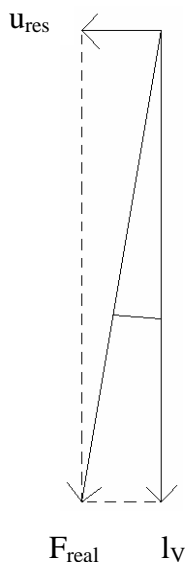
Abbildung 23: Statisches System ohne Belastung

Belastungssituation:



Beim Aufbringen der Zugkraft verformt sich der Winkel in die negative y-Richtung.
Ein Teil der Verformung wird durch den Teil der Konstruktion oberhalb der Kraftmessdose aufgenommen.
Die restliche Verformung wird durch die Gelenkkonstruktion unterhalb der Kraftmessdose aufgenommen.

Abbildung 24: Statisches System mit Belastung



u_{res} ... Verformung unterhalb der Kraftmessdose
 F_{KMD} ... Angezeigte Vertikalkraft Kraftmessdose
 F_{real} ... reale Zugkraft
 l_v ... Länge zwischen Kraftmessdose und Winkeloberkante

u_{res} = Mittelwert Wegaufnehmer 1 und 2 – Messuhr 1

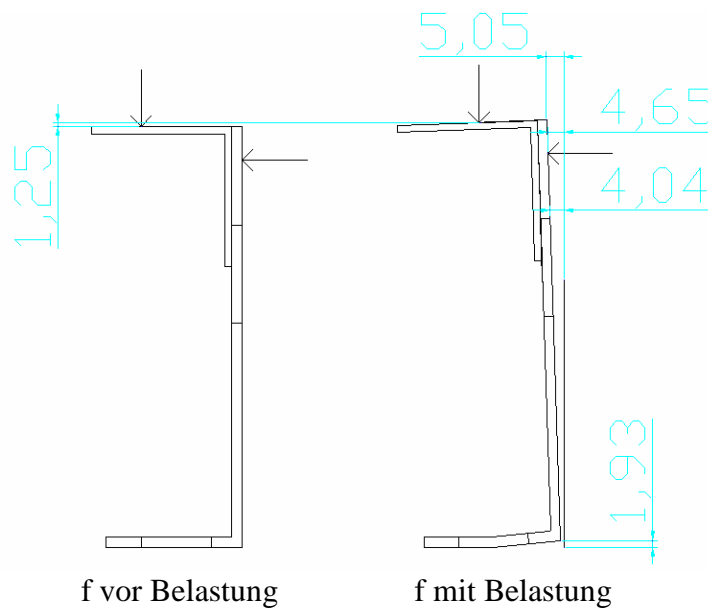
$$F_{real} = \frac{F_v}{\cos \alpha}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{u_{res}}{l_v} \right)$$

Abbildung 25: Verformung zwischen Gelenk 1 und 2

Beispiel: L120-3

Während der Belastung verformt sich der Winkel in y-Richtung und in x-Richtung



- in Abbildung 26 ist ein L120-3 Winkel, vor und während der Belastung von 6,5kN dargestellt.
- die Wegaufnehmer bleiben starr an gleicher Position.
- angezeigte Verformung in y-Richtung ist 4,63mm; wirkliche Verformung ist 5,05mm
- angezeigte Verformung in z-Richtung ist 1,25mm; wirkliche Verformung ist 1,93mm
- der Mittelpunkt des Bolzens über den die Zugkraft in den Winkel eingeleitet wird, verschiebt sich um 4mm
- Messuhr zeigt 0,5mm an

Abbildung 26: Winkel L120-3 vor und während der Belastung

In Punkt 2.2.6 wurden bereits Formeln zur Berechnung der realen Zugkräfte aufgestellt.

$$u_{\text{res}} = 4\text{mm} - 0,5\text{mm} = 3,5\text{mm}$$

$$F_{\text{KMD}} = 6,5 \text{ kN}$$

F_{real} ... reale Zugkraft

$$l_v = 500\text{mm}$$

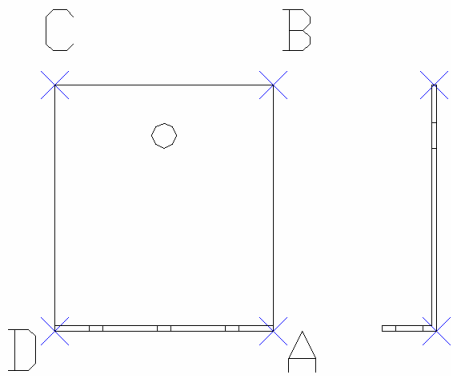
$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{u_{\text{res}}}{l_v} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{3,5\text{mm}}{500\text{mm}} \right) = 0,401^\circ$$

$$F_{\text{real}} = \frac{F_{\text{KMD}}}{\cos \alpha} = \frac{6,5}{\cos 0,401} = \underline{\underline{6,50015 \text{ kN}}}$$

Erkenntnis: Aufgrund der nur kleinen Außermittigkeit und des nachgiebigen Versuchsaufbau kommt es zu einer unwesentlichen Querkraftbildung und somit wird der angezeigte Wert der Kraftmessdose fast nicht beeinflusst.

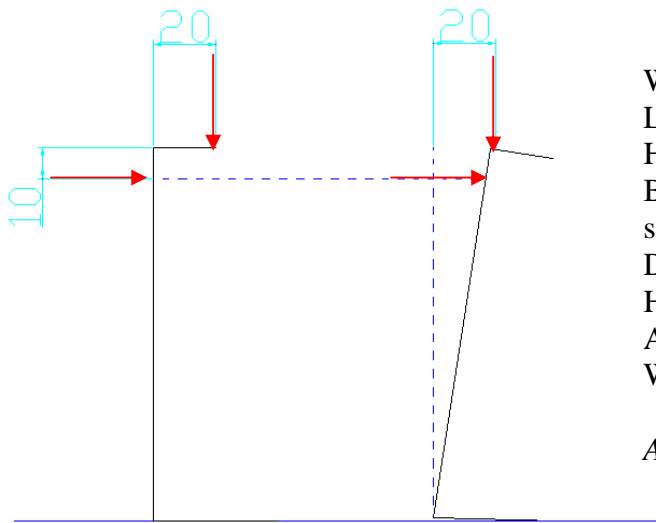
Diese Korrekturrechnung kann komplett vernachlässigt werden!

b) Korrekturrechnung der realen Verformung



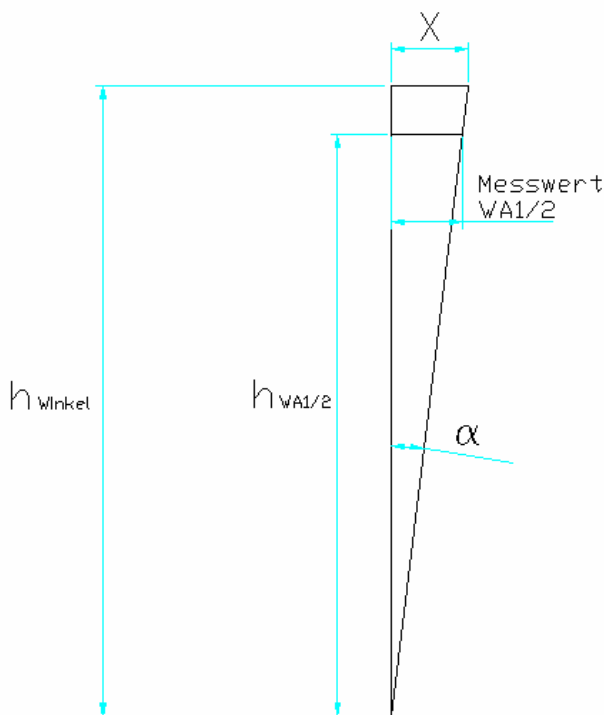
Die Punkte A bis D sind maßgebend beim Vergleich der Verformung. Diese Werte müssen rechnerisch ermittelt werden, da die Wegaufnehmer konstruktiv anders angeordnet werden mussten.

Abbildung 27: Ansicht Punkte A-D



Wegaufnehmer sind fest installiert, der Lagerbock mit dem aufgeklebten Hilfswinkel ist anfangs nicht verformt. Bei Aufbringen der Belastung verformt sich der Lagerbock wie in Abbildung 25. Die Wegaufnehmer wandern auf dem Hilfswinkel. Dadurch gibt es Abweichungen bei den angezeigten Werten.

Abbildung 28: Detail Wegaufnehmer

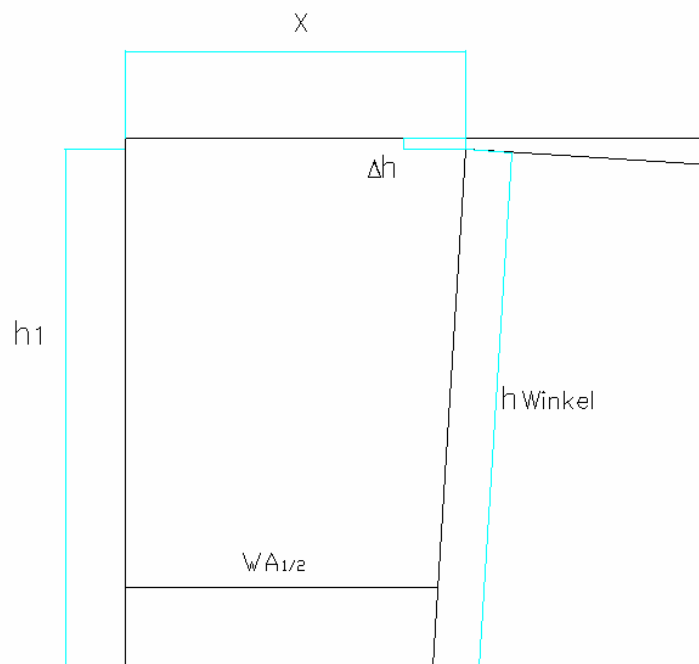


$$y\text{-Verschiebung } B/C = \frac{h_{\text{Winkel}}}{h_{\text{WA1}}} * WA_{1/2}$$

WA_{1/2}...Wegaufnehmer 1/2

$$\alpha = \tan^{-1} * \left(\frac{X}{h_{\text{Winkel}}} \right)$$

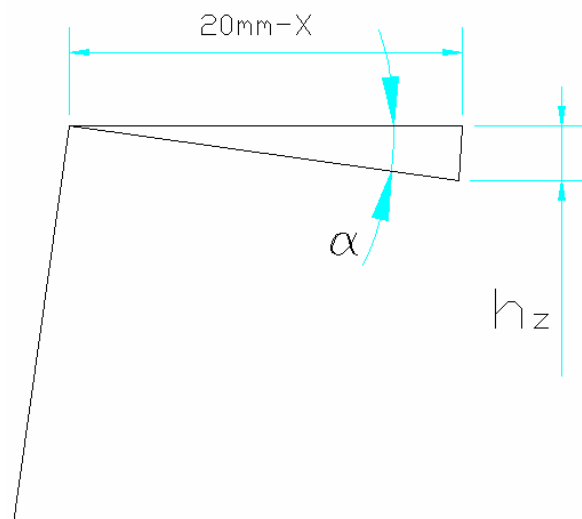
Abbildung 29: y-Verschiebung Punkt B/C



$$h_1 = \cos \alpha * h_{\text{Winkel}}$$

$$h_1 = h_{\text{Winkel}} - \Delta h$$

$$\Delta h = h_{\text{Winkel}} * (1 - \cos \alpha)$$

Abbildung 30: Detail Δh 

$$h_z = \tan \alpha * 20\text{mm} - X$$

$$\Delta h_{\text{Gesamt}} = h_z + \Delta h$$

$$z\text{-Verschiebung A/D} = \Delta h_{\text{Gesamt}} - WA_{3/4}$$

$WA_{3/4}$...Wegaufnehmer 3/4

Abbildung 31: Detail z -Verschiebung A/D

Proberechnung am Beispiel: L120-3-A

Winkel wird mit einer Zugkraft von 6,5kN belastet. WA1 zeigt 4,629mm an und WA3 1,0375mm. Daraus ergibt sich eine tatsächliche Verformung im Punkt A von 1,77mm und im Punkt B von 5,05mm.

hWinkel	120	hz	0,63
hWA1/2	110	Δh	0,11
WA1/2	4,629	Tan α	0,0421
WA3/4	1,0375	Δh_{Gesamt}	0,74

y-Verschiebung Punkt B/C	z-Verschiebung Punkt A/D
5,05	1,77

Tabelle 5: Korrekturrechnung

Diese Formeln werden später in Exceltabellen eingearbeitet und alle Messwerte damit korrigiert!

2.2.7 Versuchsdurchführung

Ziel der Versuche soll sein, bei welchen Zugkräften sich die Winkel dauerhaft verformen. Am Prüfstand wurde die Stahlunterkonstruktion mit Hilfe von „Lindapter“ Schraubklemmen am unteren Rahmen festgeschraubt und die Anhängkonstruktion inkl. Kraftmessdose ordnungsgemäß am Zylinder befestigt. Die Durchführung der Versuche erfolgt der Reihe nach vom kleinsten zum größten Winkel. Jeder Winkeltyp wird in der jeweiligen Lastangriffsposition fünfmal geprüft, um evtl. Material- und Herstellungsfehler auszuschließen. Um ein zuverlässiges Ergebnis zu bekommen, wird der Mittelwert der 5 Versuche für weitere Betrachtungen ermittelt.

Allgemeiner Ablauf:

- Einstellen der Grundwerte am Spider8
- Anschrauben des Winkels auf die Stahlunterkonstruktion mit den M10 Sechskantschrauben
- Schrauben werden mittig im Langloch mit einem Drehmoment von 8 Nm angezogen
- Ausrichten des Zylinders, so dass sich der untere Bolzen ohne zu verklemmen durch die Aufhängung und durch den Winkel einschieben lässt
- Anbringen der Wegmesser wie im Punkt 2.2.5 beschrieben
- Nullsetzen der Wegaufnehmer und der Kraftmessdose am Spider8 durch drücken von F4 Taste
- Aufbringen einer Zugkraft von ca. 0,5 kN mittels Handpumpe etwa 2s lang
- Wegaufnehmer speichern die Verformungswerte
- Entlastung des Winkels von ca. 2s; Verformung geht in Ausgangssituation zurück
- Steigerung der Zugkräfte um jeweils 0,5kN -> Entlasten -> 1,0kN -> Entlasten -> 1,5kN u.s.w...
- Ab einer bestimmten Kraft ist die Verformung des Winkels am unteren Schenkel so groß, dass eine plastische Verformung einsetzt und der Winkel nicht mehr in seine Ausgangssituation zurückgeht
- Diese plastische Verformung wird durch die Wegaufnehmer angezeigt und dokumentiert
- Bei der dauerhaften Verformung über 0,5mm wird der Versuch abgebrochen, da größere Verformungen für den weiteren Verlauf der Untersuchung keinen Einfluss mehr haben

	90°	60°	45°
120	5	5	5
160	5	5	5
180	5	5	5
210	5	5	5
230	5	5	5
240	5	5	5
280	5	5	5
Gesamtversuche:	105		

Tabelle 6: Anzahl der Versuche

2.2.8 Auswerten der Versuchsergebnisse

Um einen Überblick zu bekommen, wie man von den Versuchsergebnissen zu den tatsächlichen Verformungen gelangt, wird in diesem Punkt am Beispiel des kleinsten Winkels mit einer Höhe von 120mm und der Wandstärke von 3mm Schritt für Schritt erklärt.

- 1. Schritt:** - Die Spider 8 Software zeichnet pro Sekunde die Messwerte über den ganzen Versuch hinweg auf. In diesem Fall sind es 198 Messwerte.

Zeit [s]	Kan 0 [mm]	Kan 1 [mm]	Kan 2 [mm]	Kan 3 [mm]	Kan 4 [mm]	Kan 5 [N]	Kan 6 [N]	Kan 7 [N]	Dig. Input [Digit]
1	11:28	11:28	11:28	11:28	11:28	11:28	11:28	11:28	11:28
2	11:28:16	0.00000	0.00000	0.00000	-0.28000	-0.12859	---	---	---
3	11:28:17	500.00 ms	500.00 ms	500.00 ms	3.18 min	2.88 min	---	---	---
4	11:31:32	5.00500	2.62559	1.81281	0.13375	0.23720	---	---	---
5	---	3.14 min	3.16 min	3.16 min	3.14 min	3.16 min	---	---	---
6	---	1.55480	0.61338	0.54096	-0.09554	-0.00911	---	---	---
7	---	1.40185	0.77802	0.56604	0.09910	0.07103	---	---	---
8	0.00 s	0.00 s	0.00 s	0.00 s	0.00 s	0.00 s	---	---	0.00 s
9	1.00 s	1.00 s	1.00 s	1.00 s	1.00 s	1.00 s	---	---	1.00 s
10	198	198	198	198	198	0	0	0	198
11	11:28:16	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	>>>	>>>	>>>
12	11:28:17	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00125	>>>	>>>	>>>
13	11:28:18	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00125	>>>	>>>	>>>
14	11:28:19	0.07802	0.00375	0.00000	0.00000	-0.00125	>>>	>>>	>>>
15	11:28:20	0.23405	0.01498	0.00499	0.00000	-0.00125	>>>	>>>	>>>
16	11:28:21	0.33607	0.03371	0.01748	0.00000	0.00000	>>>	>>>	>>>
17	11:28:22	0.42609	0.08999	0.04120	-0.01750	-0.00125	>>>	>>>	>>>
18	11:28:23	0.46209	0.12110	0.05483	-0.01750	-0.00375	>>>	>>>	>>>
19	11:28:24	0.48910	0.13983	0.06367	-0.01750	-0.00375	>>>	>>>	>>>
20	11:28:25	0.48910	0.14107	0.06617	-0.01750	-0.00499	>>>	>>>	>>>
21	11:28:26	0.08402	0.01748	0.03121	-0.02000	-0.00999	>>>	>>>	>>>
22	11:28:27	0.05401	0.01623	0.02996	-0.02000	-0.00999	>>>	>>>	>>>
23	11:28:28	0.04201	0.01623	0.02996	-0.02000	-0.00999	>>>	>>>	>>>
24	11:28:29	0.03601	0.01623	0.02871	-0.02000	-0.00999	>>>	>>>	>>>
25	11:28:30	0.06601	0.01623	0.02871	-0.02000	-0.00999	>>>	>>>	>>>
26	11:28:31	0.06601	0.01623	0.02871	-0.02000	-0.00999	>>>	>>>	>>>
27	11:28:32	0.03601	0.01623	0.02871	-0.02000	-0.00999	>>>	>>>	>>>
28	11:28:33	0.03001	0.01623	0.02871	-0.02000	-0.00999	>>>	>>>	>>>
29	11:28:34	0.02400	0.01623	0.02747	-0.02000	-0.00999	>>>	>>>	>>>
30	11:28:35	0.02400	0.01623	0.02747	-0.02000	-0.00999	>>>	>>>	>>>
31	11:28:36	0.03601	0.01623	0.02747	-0.02000	-0.00999	>>>	>>>	>>>
32	11:28:37	0.27005	0.02372	0.02996	-0.02000	-0.00999	>>>	>>>	>>>
33	11:28:38	0.46809	0.12360	0.05888	-0.02125	-0.00999	>>>	>>>	>>>
34	11:28:39	0.73815	0.30836	0.16386	-0.02125	-0.01623	>>>	>>>	>>>
35	11:28:40	0.97818	0.41323	0.21473	-0.02125	-0.02871	>>>	>>>	>>>
36	11:28:41	0.91218	0.43448	0.22946	-0.02125	-0.03121	>>>	>>>	>>>
37	11:28:42	0.95419	0.46892	0.24969	-0.02125	-0.03620	>>>	>>>	>>>
38	11:28:43	0.97820	0.48564	0.26092	-0.02125	-0.03745	>>>	>>>	>>>
39	11:28:44	0.97820	0.48689	0.26342	-0.02125	-0.03745	>>>	>>>	>>>
40	11:28:45	0.75615	0.40699	0.23346	-0.02250	-0.03995	>>>	>>>	>>>
41	11:28:46	0.06602	0.05493	0.05743	-0.04875	-0.02247	>>>	>>>	>>>

Abbildung 32: Ergebnisübersicht Spider8

2. Schritt: - Aus der Spider - Liste werden die benötigten Werte abgelesen und in eine Excel Tabelle eingefügt. In dieser Tabelle sind die Formeln aus der Korrekturrechnung 2.2.7 eingearbeitet. So werden automatisch die tatsächlichen Verformungen an den Punkten A, B, C und D ausgerechnet.

120-3-A	90°
---------	-----

hWinkel	120
---------	-----

hWA1/2	110
--------	-----

Zuglast in kN	WA1	WA2	WA3	WA4	"Punkt B"	"Punkt C"	"Punkt A"	"Punkt D"
0	0,00000	0,00000	-0,00250	-0,00125	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,23845	0,17603	-0,00250	-0,00125	0,26	0,19	0,04	0,03
0	0,06117	0,05618	-0,01375	-0,01248	0,07	0,06	0,00	0,00
1	0,68664	0,58302	0,03750	0,03745	0,75	0,64	0,16	0,14
0	0,11486	0,10487	-0,02625	-0,02122	0,13	0,11	-0,01	0,00
1,5	1,03870	0,90637	0,09625	0,07865	1,13	0,99	0,28	0,24
0	0,14607	0,12859	-0,03250	-0,02996	0,16	0,14	-0,01	-0,01
2	1,38202	1,22722	0,16375	0,14607	1,51	1,34	0,41	0,36
0	0,20350	0,16729	-0,03500	-0,03620	0,22	0,18	0,00	-0,01
2,5	1,69913	1,53683	0,23500	0,23096	1,85	1,68	0,53	0,50
0	0,25968	0,19850	-0,03750	-0,04494	0,28	0,22	0,01	-0,01
3	2,01498	1,82896	0,30500	0,32584	2,20	2,00	0,65	0,64
0	0,43820	0,28589	-0,04000	-0,05368	0,48	0,31	0,04	0,00
3,5	2,40824	2,15106	0,39375	0,43820	2,63	2,35	0,80	0,81
0	0,67790	0,41573	-0,03875	-0,05493	0,74	0,45	0,08	0,02
4	2,82772	2,49688	0,48750	0,55431	3,08	2,72	0,96	0,98
0	0,85144	0,56554	-0,03375	-0,05243	0,93	0,62	0,12	0,05
4,5	3,12984	2,77778	0,57250	0,66167	3,41	3,03	1,09	1,13
0	1,14981	0,76280	-0,03000	-0,04994	1,25	0,83	0,17	0,09
5	3,51061	3,08115	0,66500	0,77278	3,83	3,36	1,24	1,29
0	1,40699	1,02747	-0,01375	-0,03496	1,53	1,12	0,23	0,15
5,5	3,86142	3,42572	0,76875	0,90637	4,21	3,74	1,40	1,47
0	1,72035	1,33084	-0,00125	-0,01748	1,88	1,45	0,30	0,22
6	4,22722	3,80399	0,90125	1,07366	4,61	4,15	1,58	1,69
0	2,15730	1,74282	0,01875	0,01373	2,35	1,90	0,39	0,32
6,5	4,62921	4,21973	1,03750	1,25343	5,05	4,60	1,77	1,93
0	2,63920	2,17353	0,04875	0,06242	2,88	2,37	0,49	0,43

Tabelle 7: Korrekturrechnung

Diese Tabelle gibt es von der Versuchsreihe A bis E der jeweiligen Winkelhöhen.

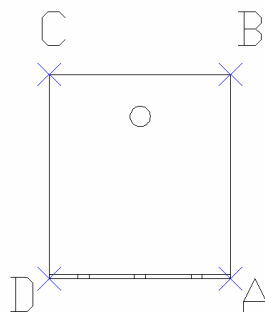


Abbildung 33: Punkte A-D

3. Schritt: - Es werden aus den 5 Versuchsreihen A bis E die Durchschnitte gebildet.

Durchschnitt	L 120-3-90
--------------	------------

	Punkt A	Punkt B	Punkt C	Punkt D
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,04	0,26	0,24	0,03
0	0,00	0,10	0,08	0,00
1	0,12	0,65	0,61	0,12
0	0,01	0,19	0,16	0,00
1,5	0,21	1,00	0,94	0,20
0	0,01	0,25	0,23	0,00
2	0,31	1,30	1,23	0,28
0	0,01	0,32	0,29	0,00
2,5	0,43	1,65	1,56	0,39
0	0,01	0,42	0,40	0,01
3	0,54	1,95	1,84	0,49
0	0,02	0,56	0,51	0,02
3,5	0,65	2,24	2,12	0,60
0	0,04	0,72	0,66	0,03
4	0,77	2,57	2,43	0,74
0	0,06	0,92	0,86	0,05
4,5	0,90	2,88	2,74	0,83
0	0,08	1,15	1,08	0,08
5	1,03	3,20	3,06	0,99
0	0,12	1,42	1,35	0,12
5,5	1,17	3,52	3,39	1,13
0	0,16	1,72	1,66	0,16
6	1,31	3,85	3,73	1,27
0	0,22	2,11	2,04	0,22
6,5	1,48	4,21	4,11	1,46
0	0,29	2,57	2,50	0,30
7	1,57	4,35	4,37	1,50
0	0,32	2,96	3,01	0,33
7,5	1,75	4,69	4,74	1,70
0	0,40	3,49	3,55	0,42
8	1,94	5,06	5,13	1,91
0	0,53	4,24	4,31	0,56
8,5	2,15	5,46	5,56	2,18
0	0,65	4,94	5,01	0,70

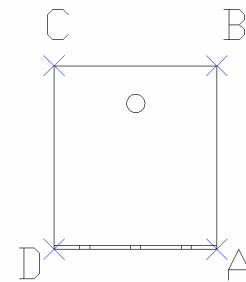


Tabelle 8: Übersicht Durchschnitte

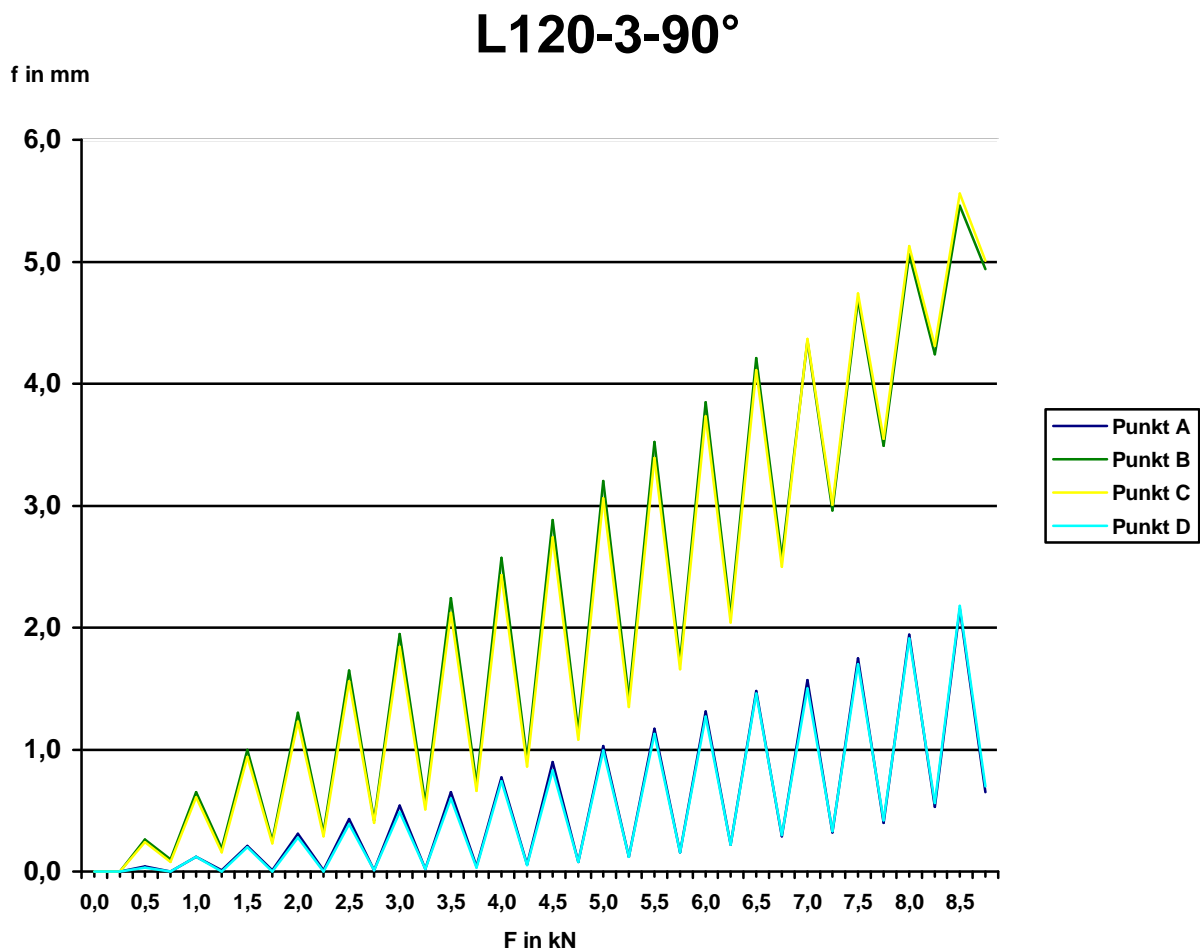
4. Schritt: - Abbildung der durchschnittlichen Verformungen in einem Diagramm

Abbildung 34: Diagramm L120-3-90°

Anhand dieses Diagramms kann man feststellen, dass der L120-3 sich schon bei der kleinsten Kraft von 0,5 kN dauerhaft verformt. Punkt B und C gehen nach der Belastung von 0,5 kN nicht mehr in die Ausgangssituation zurück. Sollten die Befestigungswinkel durch spezielle Konstruktionen gegen Ausweichen in y-Richtung gesichert sein, kann der Winkel eine Zugbelastung von 6 kN abtragen, ohne dass er sich in z-Richtung über 0,2mm dauerhaft verformt.

	Punkt A	Punkt B	Punkt C	Punkt D
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,04	0,26	0,24	0,03
0	0,00	0,10	0,08	0,00
1	0,12	0,65	0,61	0,12
0	0,01	0,19	0,16	0,00
1,5	0,21	1,00	0,94	0,20
0	0,01	0,25	0,23	0,00

Tabelle 9: Anfangswerte Diagramm L120-3-90°

- Anfangswerte des Diagramms werden mit abgebildet, da diese bei den vergleichenden Betrachtungen im Punkt 5 benötigt werden

2.3 Aspekte zur Finite-Elemente-Methode (FEM) im Hinblick auf die programmtechnische Anwendung

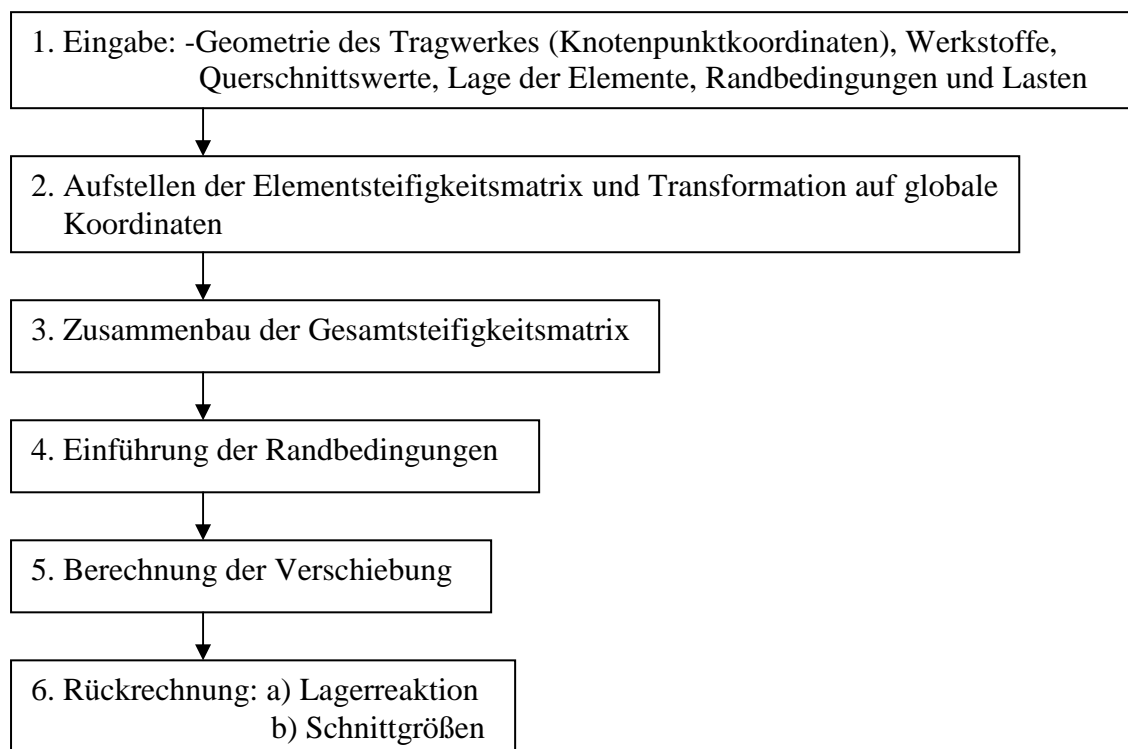
2.3.1 Allgemeines zu EDV-Programm

Ein weit verbreitetes modernes Berechnungsverfahren im Ingenieurwesen ist die „Methode der finiten Elemente“ oder auch „Finite- Elemente- Methode“, kurz FEM. Es ist ein numerisches Verfahren zum näherungsweise Lösen von Differentialgleichungen mit Randbedingungen.

Mit der FE-Methode können Probleme aus verschiedenen physikalischen Disziplinen berechnet werden, da es sich grundsätzlich um ein numerisches Verfahren zur Lösung von Differentialgleichungen handelt. Zunächst wird das Berechnungsgebiet in eine beliebig große Anzahl Elemente unterteilt. Diese Elemente sind „endlich“ (finit) und nicht unendlich (infini) klein. Das Aufteilen des Gebiets in eine bestimmte Anzahl Elemente finiter Größe, die sich mit einer endlichen Zahl von Parametern beschreiben lassen, gab der Methode den Namen „Finite-Elemente-Methode“.

Innerhalb dieser Elemente werden Ansatzfunktionen definiert (z. B. lokale Ritz-Ansätze je Element). Setzt man diese Ansatzfunktionen in die zu lösende Differentialgleichung ein, erhält man zusammen mit den Anfangs-, Rand- und Übergangsbedingungen ein Gleichungssystem, welches in der Regel numerisch gelöst wird. Die Größe des zu lösenden Gleichungssystems hängt maßgeblich von der Anzahl der finiten Elemente ab. Seine Lösung stellt letztlich die numerische Lösung der betrachteten Differentialgleichung dar.“

Der komplette Berechnungsablauf der Finiten- Element- Methode lässt sich auch in einem Blockdiagramm vereinfacht darstellen.



2.3.2 RFEM4

Statikprogramm für Platten, Scheiben, Schalen, Volumenkörper und Stabwerke von der Firma Ingenieur-Software Dlubal GmbH

Mit RFEM 4 steht dem anspruchsvollen Tragwerksplaner ein 3D-FEM-Programm zur Verfügung, das den Anforderungen im modernen Ingenieurbau gerecht wird und das den aktuellen Stand der Technik widerspiegelt.

RFEM bildet die Grundlage eines modularen Softwaresystems: Das Basismodul RFEM ermittelt die Schnittgrößen, Verformungen und Lagerreaktionen von Flächen- und Stabtragwerken. Für die weitere Bemessung stehen Zusatzmodule bereit, die die material- und normenspezifischen Gegebenheiten berücksichtigen. Dank des modularen Softwarekonzepts kann ein Programmpaket geschnürt werden, das auf die individuellen Erfordernisse abgestimmt ist.



Weiter Informationen unter: www.dlubal.de

2.3.3 Vorbetrachtung RFEM4

Das Untersuchen von Spannungs- und Verformungsproblemen mit Softwaresystemen ist sehr gefährlich. Es ist selbst für einen Ingenieur bei komplexen Gebilden nicht nachvollziehbar, wie das Programm arbeitet und welche evtl. Fehler es beinhaltet. Es sollten viele Sachen vereinfacht werden, um die Berechnungen nachvollziehen zu können. Im Punkt 2.3.3 werden Versuche an einem einfachen statischen System geprüft, um Berechnungskriterien und Randbedingungen festlegen zu können.

2.3.3.1 Eingabe Balkenmodelle

2.3.3.1.1 Geometrie

Zur vereinfachten Überprüfung wird ein Balkenstab mit einer Länge von 100mm, einer Breite von 10mm und einer Höhe von 10mm angenommen. Dieser ist gestützt durch ein Festlager am Stabanfang und einem Gleitlager am Stabende.



Abbildung 35: Träger auf 2 Stützen

Balkenstäbe als Volumen- oder Flächenmodell

Im Programm RFEM gibt es zwei Möglichkeiten, Modelle einzugeben und zu simulieren.

Flächenmodell:

- Eingabe der 4 Knotenkoordinaten

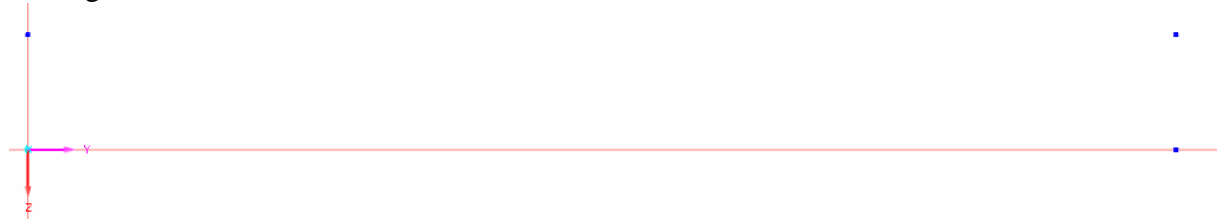


Abbildung 36: Flächenkoordinaten

	X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
Knoten 1	0.0	0.0	0.0
Knoten 2	0.0	100.0	0.0
Knoten 3	0.0	0.0	-10.0
Knoten 4	0.0	100.0	-10.0

Tabelle 10: Flächenkoordinaten

- Erzeugen einer Fläche zwischen den Knoten; Fläche hat eine konstante Dicke von 10mm;
- Als Material wird vorerst irgendein Aluminiumwerkstoff eingeladen

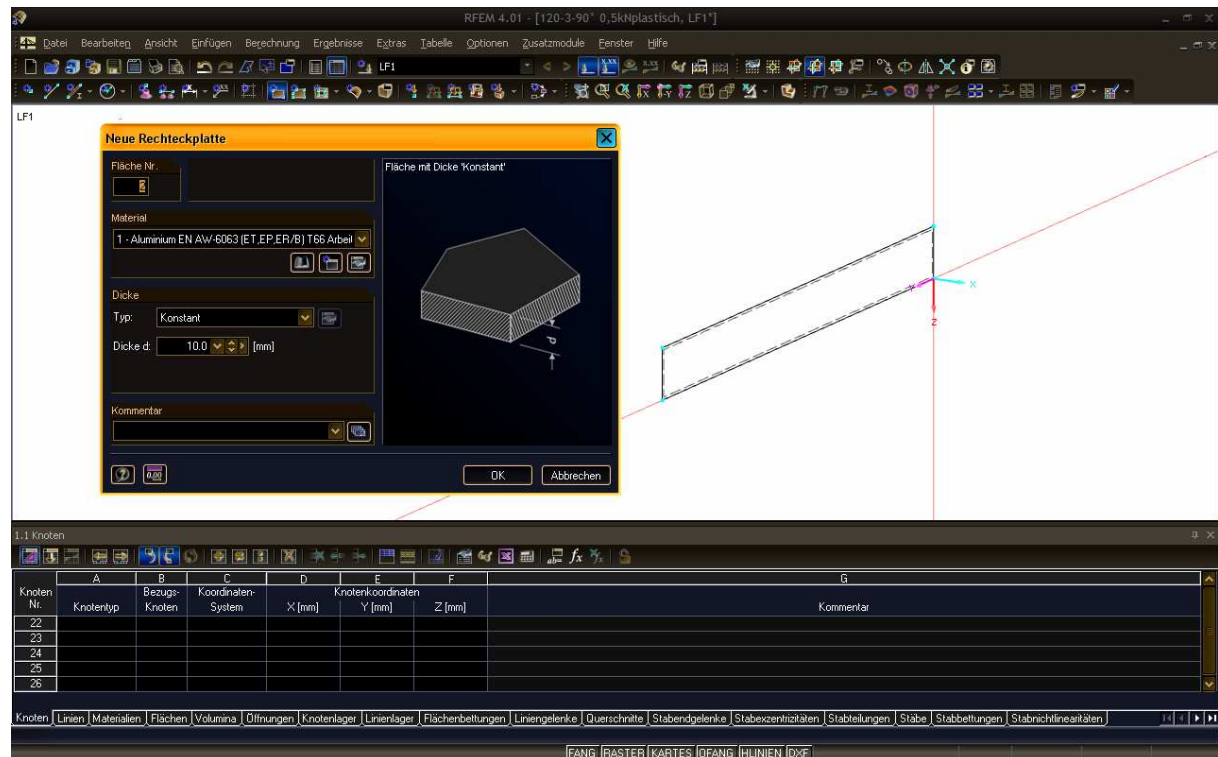


Abbildung 37: Rechteckplatte

- Eingabe der Lager; Stababfang mit Festlager und Stabende mit Gleitlager

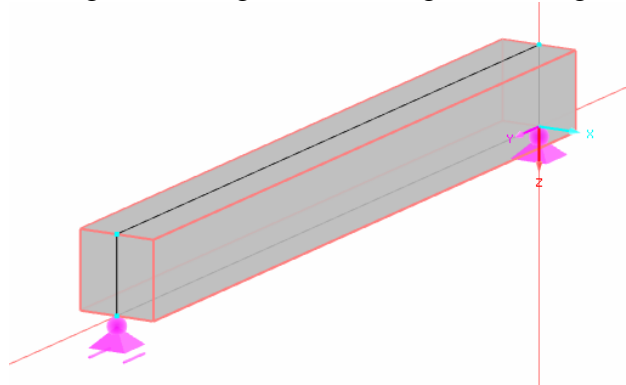


Abbildung 38: Lager am Flächenmodell

Volumenmodell:

- Eingabe der 8 Knotenkoordinaten

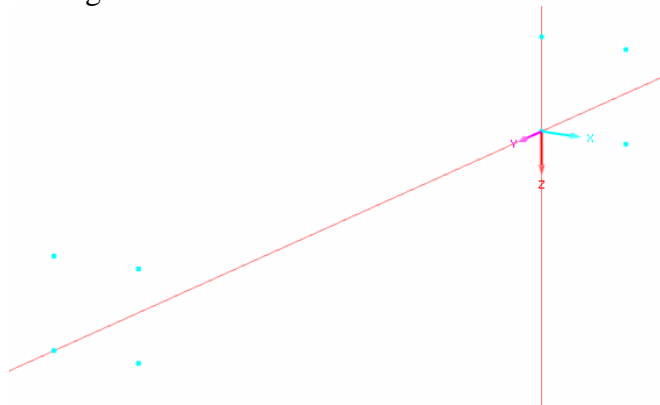


Abbildung 39: Volumenkoordinaten

	X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
Knoten 1	0.0	0.0	0.0
Knoten 2	0.0	100.0	0.0
Knoten 3	0.0	0.0	-10.0
Knoten 4	0.0	100.0	-10.0
Knoten 5	10.0	0.0	0.0
Knoten 6	10.0	100.0	0.0
Knoten 7	10.0	0.0	-10.0
Knoten 8	10.0	100.0	-10.0

Tabelle 11: Volumenkoordinaten

- Erzeugen von 6 Flächen zwischen den Knoten; Fläche wird mit einer Dicke von Null mm eingegeben

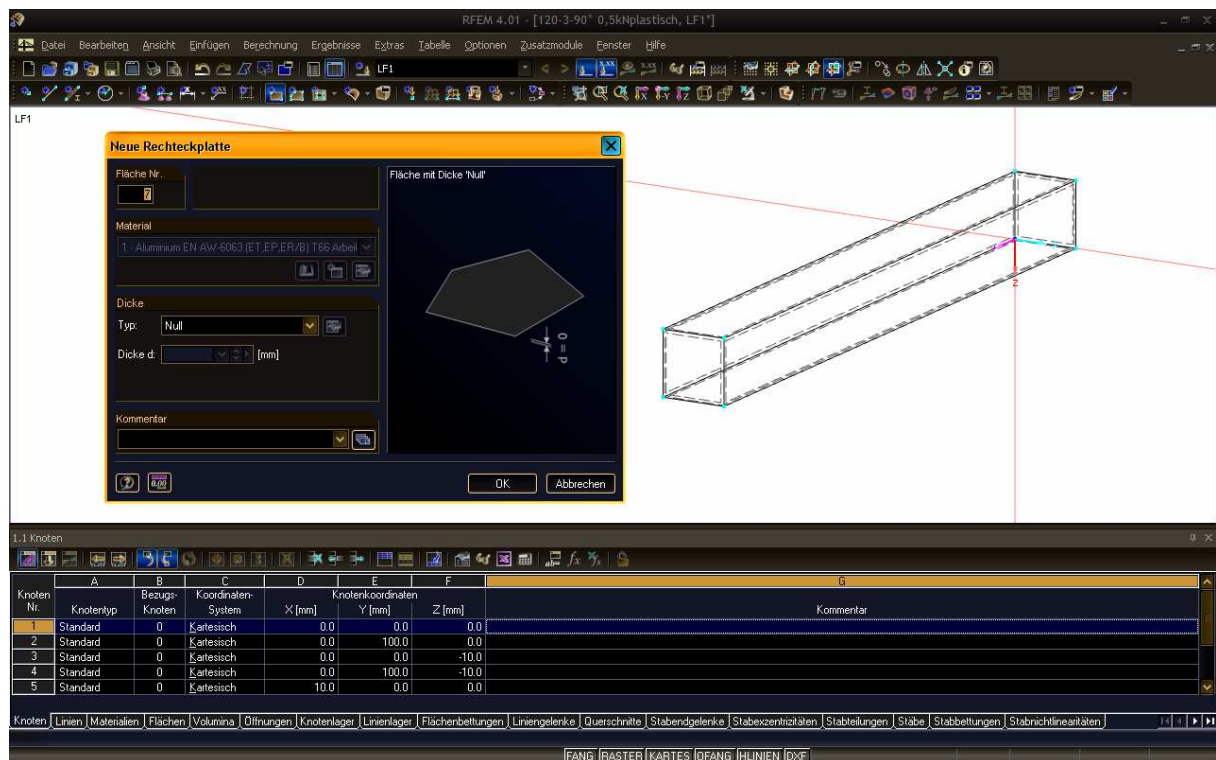


Abbildung 40: Rechteckplatte

- Erstellen des Volumenkörpers zwischen den Flächen 1-6

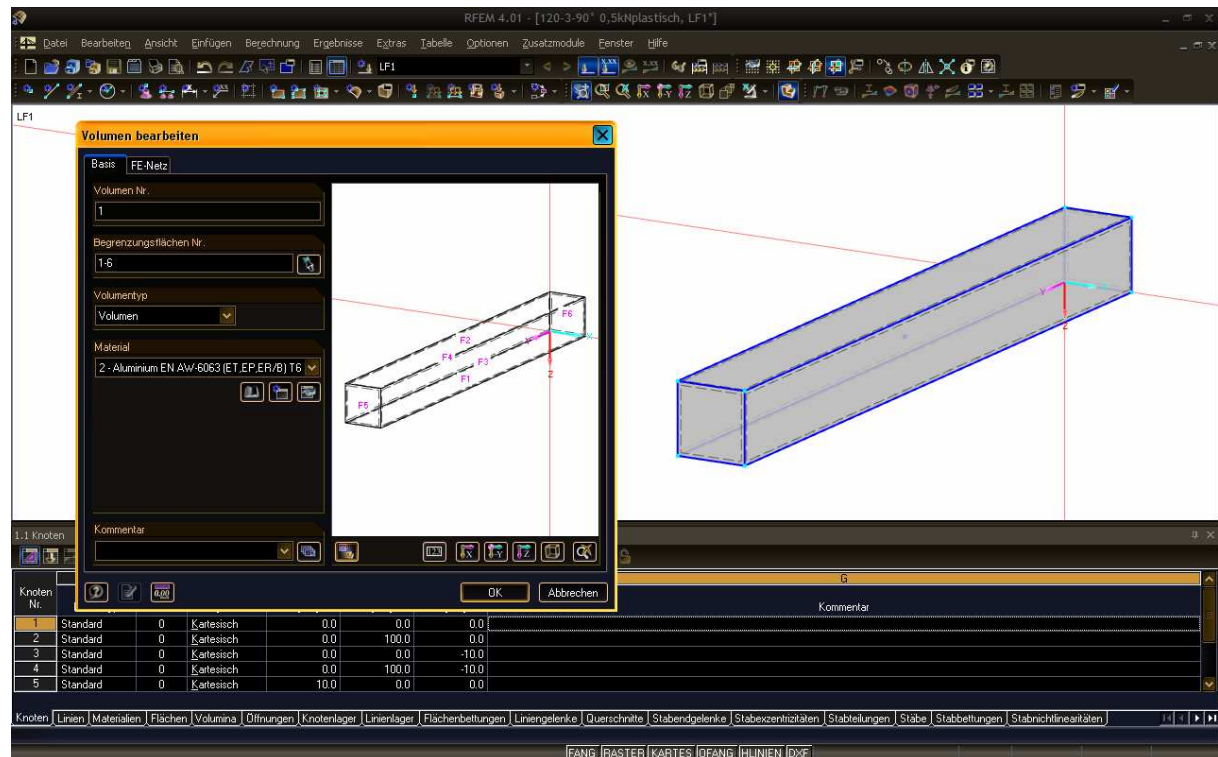


Abbildung 41: Volumenkörper

- Eingabe der Lagerung; Lagerung muss beim Volumen aus Linienlager ausgeführt werden

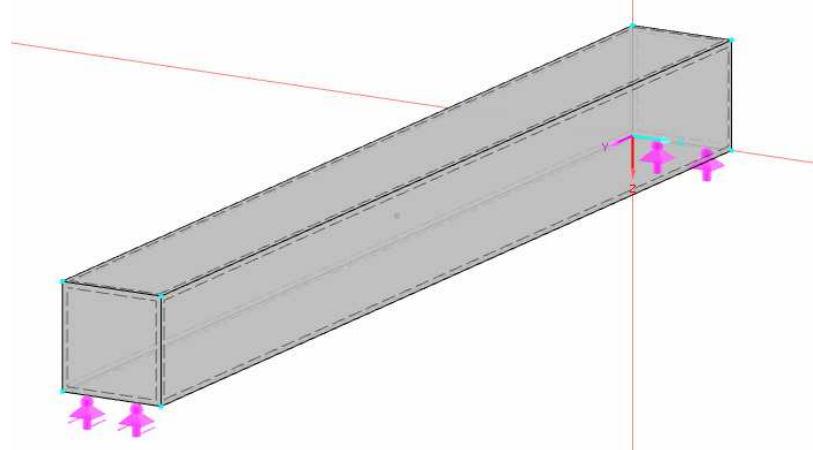


Abbildung 42: Linienlager Volumenmodell

2.3.3.1.2 Werkstoff

Im Programm RFEM gibt es eine Materialbibliothek mit gespeicherten Materialkennwerten. Der gespeicherte Werkstoff Aluminium EN AW 6063 (ET,EP,ER/B) T6 hat ähnliche Materialkennwerte wie der Werkstoff EN AW – 6063 T66. Umändern der Materialkennwerte in der Materialbibliothek. Das E-Modul wird auf 6900 kN/cm^2 geändert. Die Streckgrenze und die Zugfestigkeit werden geändert auf 20.00 kN/cm^2 bzw. 24.50 kN/cm^2 . Dieses Material wird als Aluminium EN AW 6063 T66 in der Materialbibliothek abgespeichert.

Aluminium EN AW 6063 T66

Elastizitätsmodul	$E = 6900.00 \text{ kN/cm}^2$
Schubmodul	$G = 2700.00 \text{ kN/cm}^2$
Poissonsche Zahl (Querdehnzahl)	$\mu = 0.300$
Spezifisches Gewicht	$\gamma = 27.00 \text{ kN/m}^3$
Temperaturdehnzahl (Wärmedehnzahl)	$\alpha = 2.3000\text{E-}05 \text{ 1/}^\circ\text{C}$
Teilsicherheitsbeiwert	$\gamma_M = 1.10$
Streckgrenze	$f_y = 20.00 \text{ kN/cm}^2$
Zugfestigkeit	$f_u = 24.50 \text{ kN/cm}^2$
Maximale Bauteildicke (für Bereich 1)	$t = 10.0 \text{ mm}$

- Unter „Material bearbeiten“ gibt es noch die Möglichkeit, das Materialmodell für die Berechnung zu ändern bzw. anzupassen.

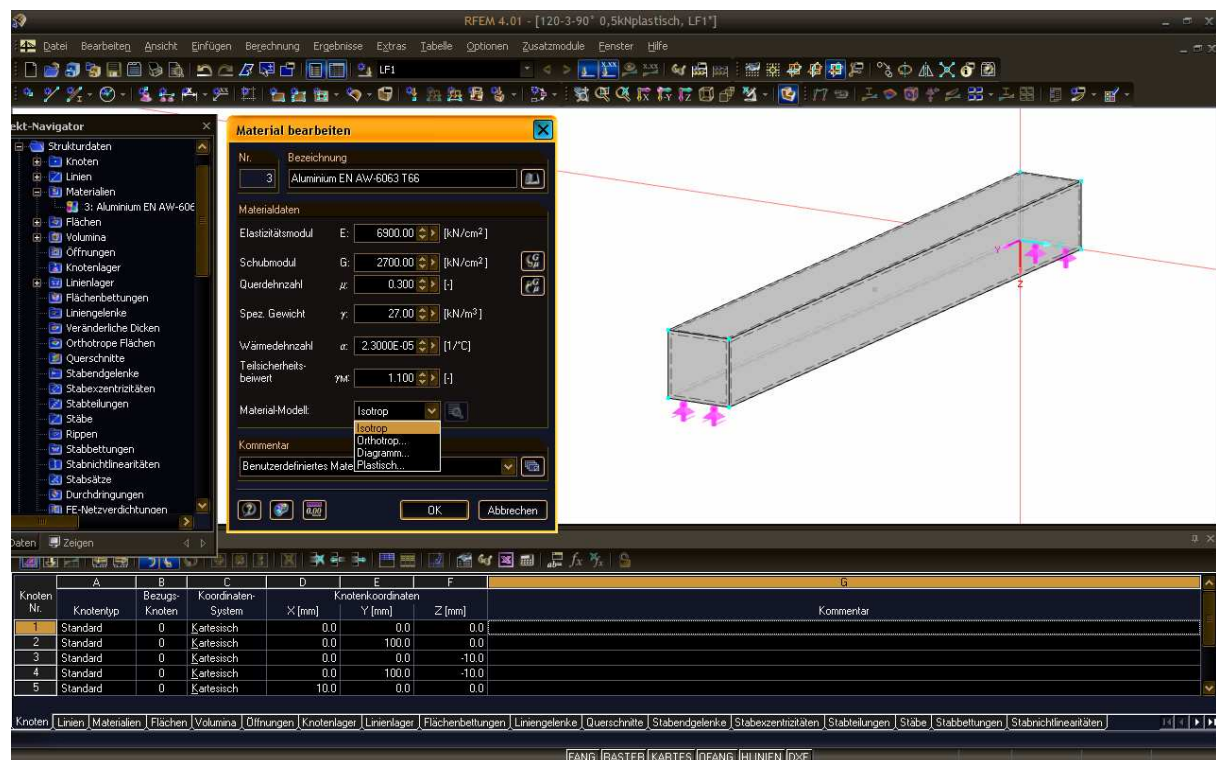


Abbildung 43: Materialmodell

Es muss eine Idealisierung des Spannungs-Dehnungsgesetzes von Aluminiumlegierungen erreicht werden, um das aktuelle plastisch - verfestigende Verhalten von Aluminiumwerkstoffen einschätzen zu können.

Es kann zwischen den Materialmodellen Isotrop, Ortotrop, Diagramm und Plastisch gewählt werden.

Isotropes Materialmodell: - Aluminium EN AW 6063 T66 ist ein homogener, isotroper Werkstoff, das heißt es treten keine Änderungen der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Richtung auf
- allerdings wird bei diesem Modell die Streckgrenze und die Zugfestigkeit bei der Berechnung nicht berücksichtigt und die Spannung kann bis in das unendliche gerechnet werden. Für reale Festigkeitsaussagen ist dieses Modell nicht geeignet

Orthotropes Materialverhalten: - ist für diesen Werkstoff nicht möglich; Aluminium ist isotrop

Diagramm-Modell: - Um das Spannungs-Dehnungsgesetz von Aluminiumlegierungen mit seinem plastisch – verfestigten Verhalten einschätzen zu können, kann mit diesem Modell ein Spannungs-Dehnungsdiagramm für Flächen erstellt werden
- auf der nächsten Seite wird genauer auf das Bi-lineare Modell nach DIN EN 1999-1-1 : 2010-05 eingegangen
- mit diesem Modell kann das plastisch - verfestigende Verhalten von Aluminiumwerkstoffen eingegeben und bei der Berechnung verwendet werden

Plastisches-Modell:- Plastizität beschreibt die Fähigkeit fester Stoffe, sich unter einer Krafteinwirkung irreversibel zu verformen (zu fließen) und diese Form nach der Einwirkung beizubehalten.
- Die Überlagerungen von Spannungen wird durch die statische Fließgrenze des Materials begrenzt.
- Spannungsspitzen werden durch örtliche oder globale Plastifizierung begrenzt oder reduziert.
- die Grenzspannung wird nach GEH von Mises mit Hilfe des Programms ermittelt
- nach der Gestaltänderungshypothese, auch Gestaltänderungsenergiehypothese (kurz: GEH) oder Mises-Vergleichsspannung genannt, tritt Versagen des Bauteils dann auf, wenn die Gestaltänderungsenergie einen Grenzwert überschreitet (s. auch Verzerrungen bzw. Deformation).
- verwendet wird diese Hypothese für zähe Werkstoffe (z.B. Stahl oder Aluminium) unter ruhender und wechselnder Beanspruchung.
- Streckgrenze $f_y = 20.00 \text{ kN/cm}^2$

Analytisches Modell für das Spannungs-Dehnungsgesetz nach DIN EN 1999-1-1:2010-05

Bi-lineares Modell

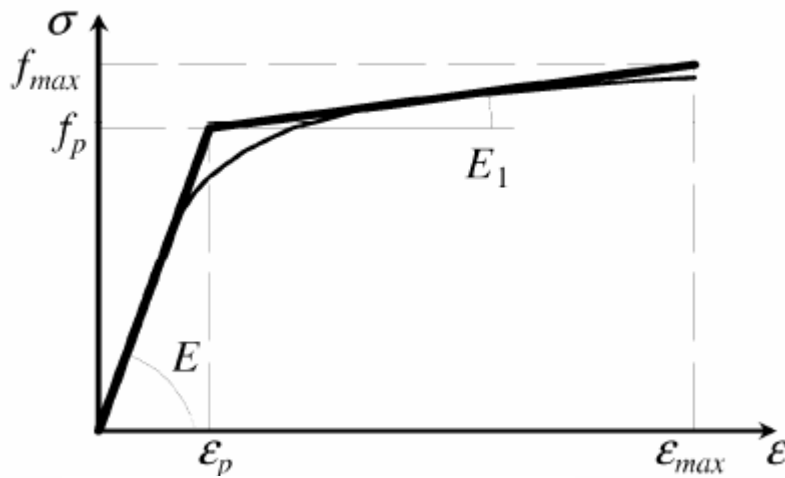


Abbildung 44: Bi-lineares Modell

$$f_p = f_o = 200 \frac{N}{mm^2} \quad \text{siehe Tabelle 3.2b DIN EN 1999-1}$$

$$f_{\max} = f_U = 245 \frac{N}{mm^2} \quad \text{siehe Tabelle 3.2b DIN EN 1999-1}$$

$$\varepsilon_p = \frac{f_o}{E} = 0,00285714$$

$$\varepsilon_U = 0,3 - 0,22 \times \frac{f_o \left(\frac{N}{mm^2} \right)}{400} \quad \text{wenn } f_o < 400 \frac{N}{mm^2}$$

$$\varepsilon_{\max} = 0,5 \times \varepsilon_U = 0,5 \times 0,3 - 0,22 \times \frac{200}{400} = 0,095$$

$$E_1 = \frac{(f_U - f_o)}{(0,5\varepsilon_U - \varepsilon_p)} = 480,91 \frac{N}{mm^2}$$

2.3.3.1.3 Lasten

Der Balken wird beim Flächenmodell mit einer Linienlast von 10kN/m bis 40kN belastet. Die Belastung ist wie in Tabelle 12 gestaffelt

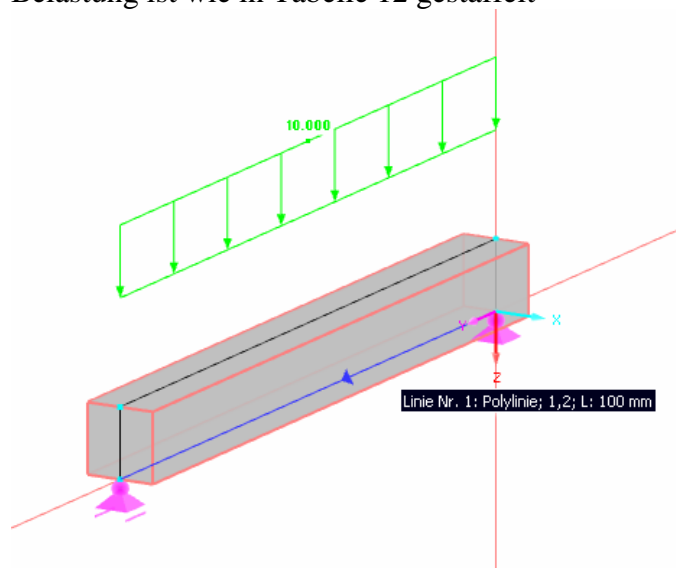


Abbildung 45: Flächenlast

Beim Volumenmodell wird der Balken mit einer Volumenlast von 1000 kN/m² bis 4000 kN/m² belastet.

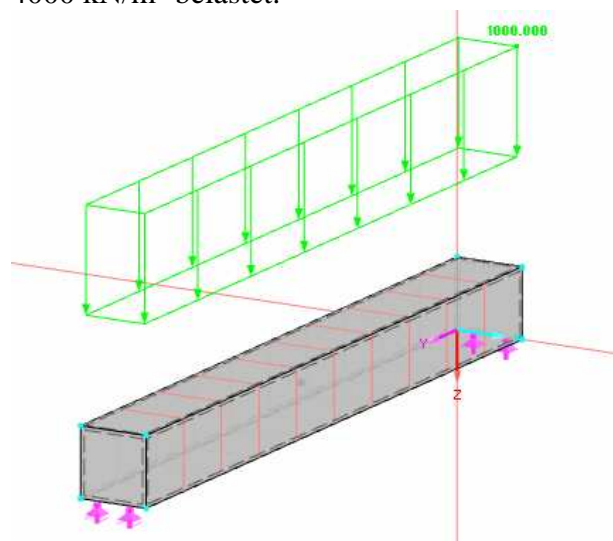


Abbildung 46: Volumenlast

10 kN/m bzw. 1000 kN/m ²	Theoretisch nur elastische Verformung
26,66 kN/m bzw. 2666 kN/m ²	Theoretische Grenze zw. elastischer und plastischer Verformung
32 kN/m bzw. 3200 kN/m ²	Theoretische Grenze zwischen plastischer Verformung und Reißen
40 kN/m bzw. 4000 kN/m ²	Theoretische Zugfestigkeit überschritten -> Versagen

Tabelle 12: Lasten

Beide Modelle werden mit den gleichen Kräften belastet, d.h. die Summe der Lagerkräfte ist gleich.

2.3.3.1.4 FE-Netz regenerieren

Für die Berechnung der Spannungen muss ein FE-Netz regeneriert werden. Je dichter das Netz, desto genauer sind die Ergebnisse. Jedoch wird die Berechnung mit jeder Verdichtung komplexer und dauert demnach länger.

Für den groben Überblick über die Spannungen und deren Verläufe wurde zunächst ein FE-Netz mit einer Finiten-Element-Länge von 5mm gewählt. Belastung 10kN/m bzw. 1000 kN/m²

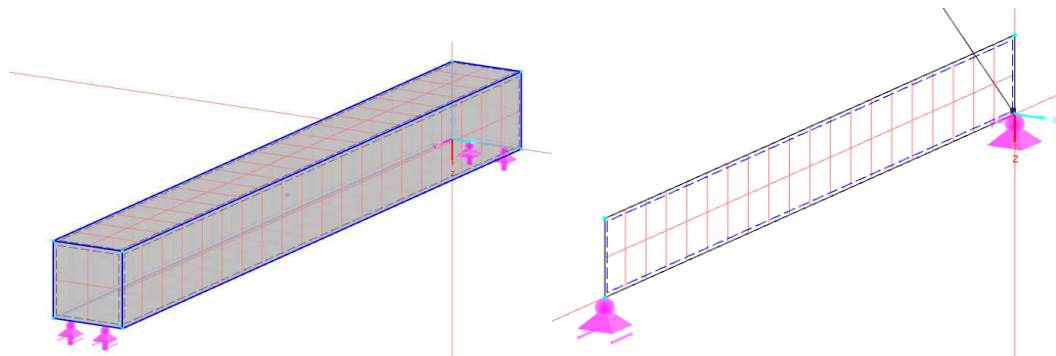


Abbildung 47: FE-Netz

Ergebnisse:

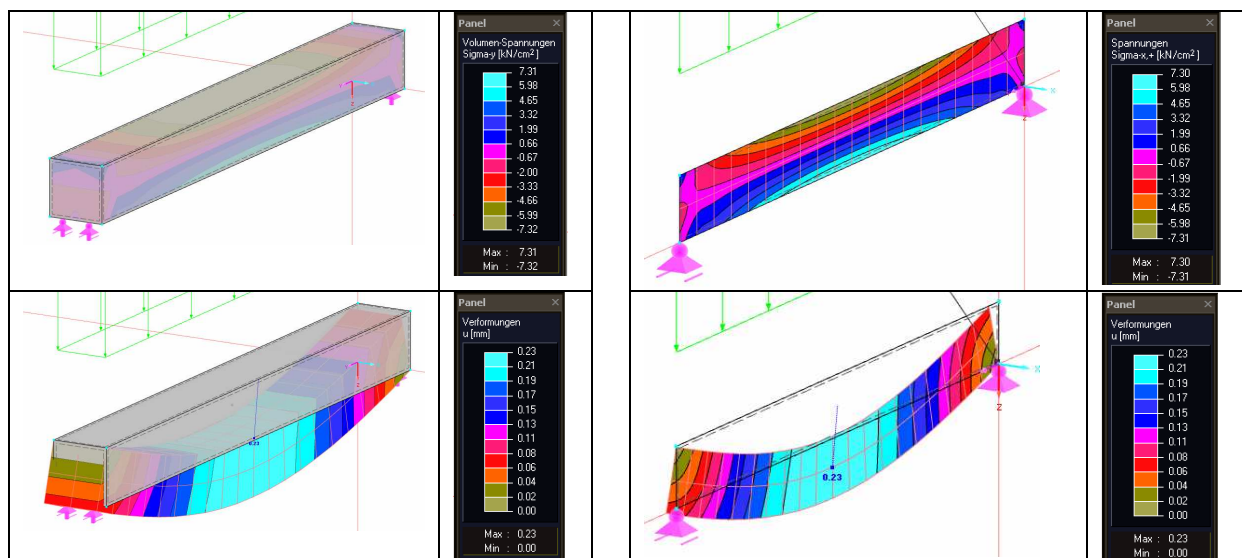


Tabelle 13: Ergebnisse Balkenmodell

Bei der nächsten Berechnung wird das FE-Netz auf 1 mm regeneriert. Andere Berechnungsparameter werden nicht geändert. Bei den Ergebnissen wird sich zeigen, ob sich die Spannung oder die Verformung bei feinerem Netz ändert.

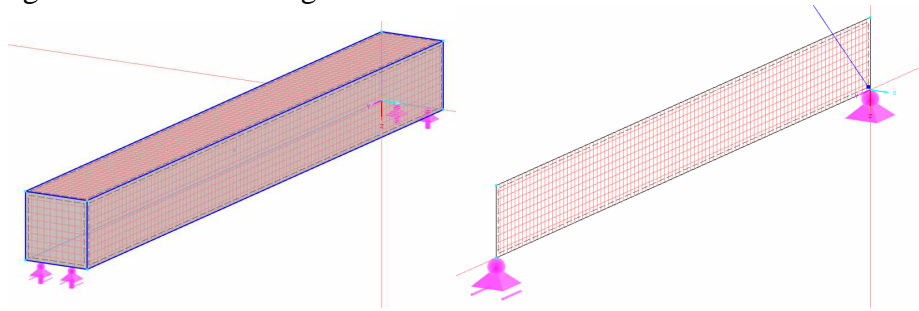


Abbildung 48: FE-Netz

Ergebnisse:

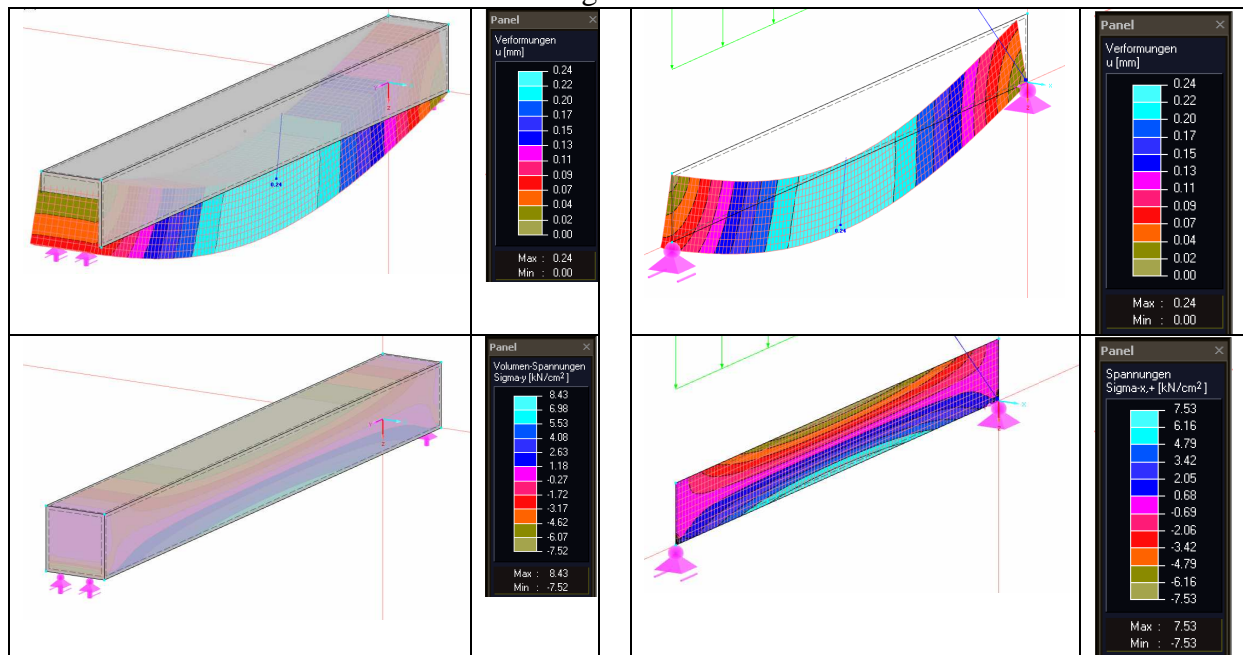


Tabelle 14: Ergebnisse Balkenmodell

- Vergleich:
- beim groben FE-Netz von 5mm zeigen beide Modelle genau die gleichen Spannungs- und Verformungswerte an.
 - beim feineren FE-Netz von 1mm ist der Verformungswert bei beiden gleich und weicht nur 0,01mm von der größeren Berechnung ab
 - bei den max. Spannungen weicht das Volumenmodell schon erheblich von den Ergebnissen der groben Berechnung bzw. von der feinen Berechnung des Flächenmodells ab
 - die Berechnung des Volumenmodells ist durch die vielen Gleichungen sehr zeitintensiv (Dauer: ca.45 min)
- Erkenntnis:
- es ist zwischen beiden FE-Netz Varianten kein Unterschied bei den Ergebnissen eingetreten
 - die erhöhten Spannungswerte beim Volumenmodell bei der Berechnung mit dem feinen FE-Netz können aufgrund von 3-dimensionale Vergleichspannungen angezeigt werden, wobei auch ein Fehler des Programms für diesen Unterschied nicht ausgeschlossen werden kann
 - die Berechnung eines Volumenmodells komplexerer Form mit einer feinen FE-Netzverdichtung ist nicht ratsam, da die Berechnung sehr lange dauert

2.3.3.1.5 Weitere Einstellungen

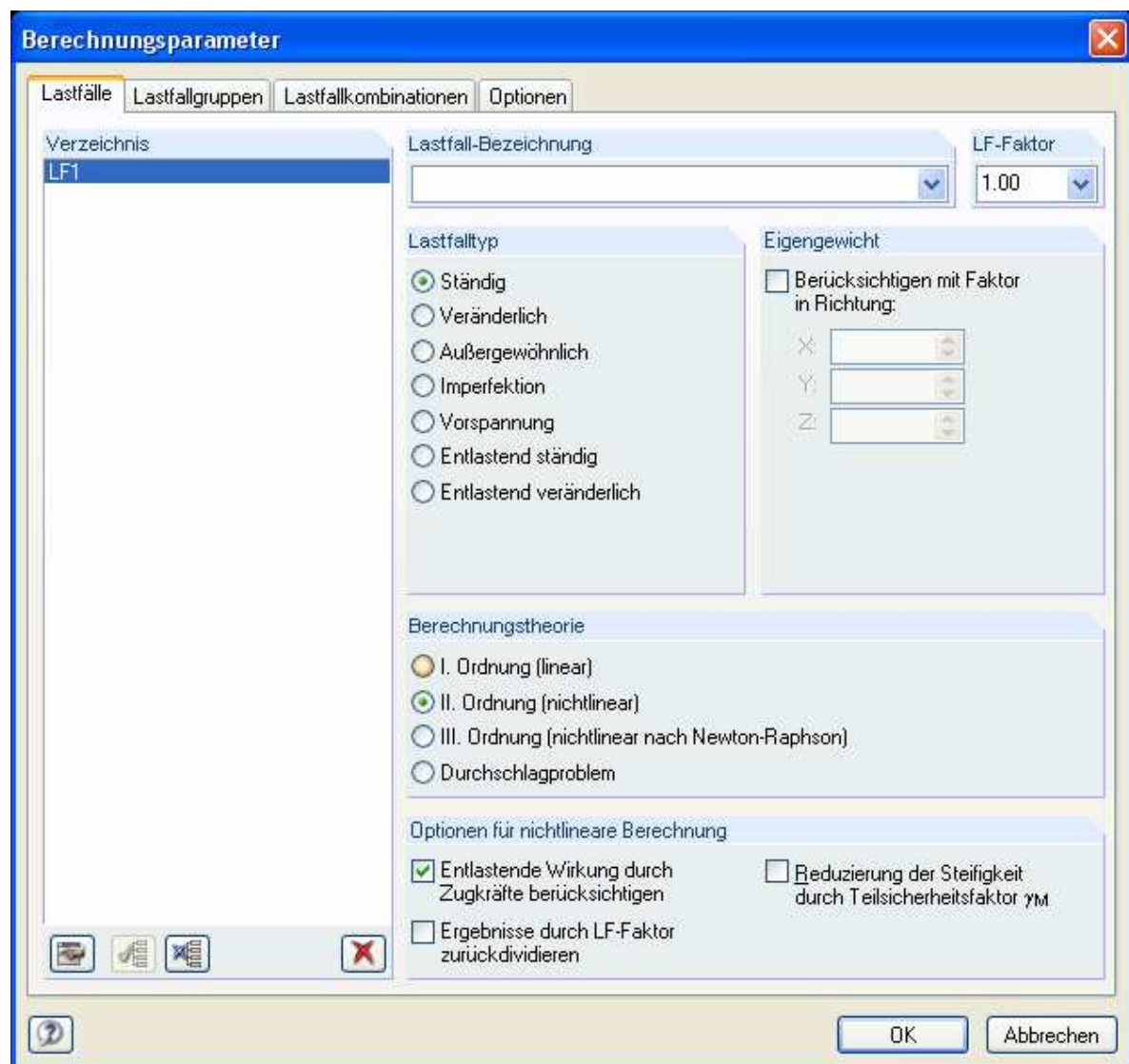


Abbildung 49: Lastfälle - Berechnungsparameter

Unter Berechnungsparameter können Einstellungen zu Berechnung gemacht werden. In der Abbildung 49 Lastfälle kann zwischen den Berechnungstheorien I. bis III. und Durchschlagen gewählt werden.

Optionen für nichtlineare Berechnung:

- kann alles vernachlässigt werden, da in diesen Versuchen keine Lastfallkombinationen bzw. mehrere Lastfälle miteinander wirken
- alle 3 Optionen werden deaktiviert

Theorie I. Ordnung: - Berechnung an unverformten Modell, Änderung am belasteten Modell wird vernachlässigt
- ist nur zulässig, wenn die Verformungen so klein sind dass sie die Ergebnisse der Berechnung nur unwesentlich beeinflussen.

Theorie 2. Ordnung: - es wird das Gleichgewicht am verformten System ermittelt, wobei die Verformungen als klein angesehen werden
- Normalkräfte im System wirken sich auf einen Zuwachs der Biegemomente aus
- Die Berechnung nach Theorie II. Ordnung kommt nur in Fällen zum tragen, in denen die Normalkräfte größer sind als die Querkkräfte. Als Abbruchkriterium wird die Normalkraftdifferenz in den einzelnen Iterationen verwendet.
- die für Theorie II. Ordnung maßgebende, steifigkeitsändernde Normalkraft wird als konstante über den ganzen Stab angenommen
- wird dabei eine eingestellte Normalkraftdifferenz unterschritten, wird die Berechnung abgebrochen
- einstellen der Konvergenzschranke für nichtlineare Berechnung kann im Register *Optionen* eingestellt werden (0,1....10)

Theorie 3. Ordnung: - wird empfohlen bei Konstruktionen mit Seilstäben
- auch Theorie großer Verformungen genannt
- Newton-Raphson-Verfahren: nichtlinearen Gleichungssystem mit numerischer und iterativer Näherung mit Tangenten
- Das Konvergenzkriterium kann über die Anzahl der Laststeigerungen beeinflusst werden
- Last global in z definieren, sonst verdreht sich Lastangriffswinkel mit dem Knoten oder der Fläche wie Verformung ist

Durchschlagproblem: - Stabilitätsanalyse im Hinblick auf das Durchschlagsversagen des Gesamtmodells (Gesamttragwerk)
- Einfluss der Normalkräfte wird für die Änderungen der Schub- und Biegesteifigkeitsmatrix berücksichtigt

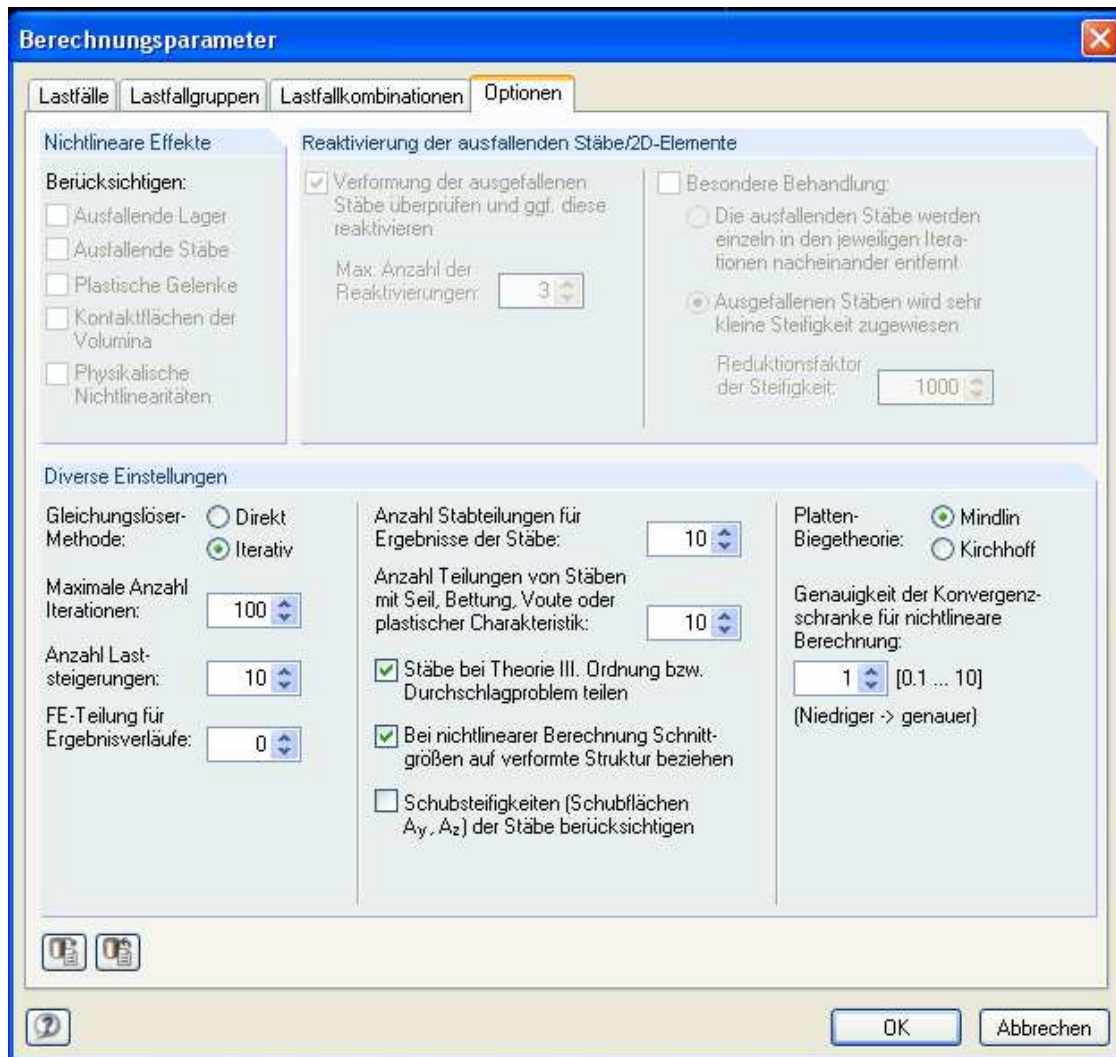


Abbildung 50: Optionen - Berechnungsparameter

Im Register Optionen unter Berechnungsparameter könnten weiter Einstellungen vorgenommen werden.

- Gleichungslösermethode:
- es kann zwischen Direkt oder Iterativ gewählt werden
 - qualitativ besteht kein Unterschied in den Ergebnissen
 - welche Methode schneller zu Ergebnissen führt, hängt von der Größe des Systems sowie von der Größe des zur Verfügung stehenden Hauptspeichers im PC ab
 - bei kleinen und mittleren Systemen ist die direkte Methode effektiver
 - bei großen Systemen führt die iterative Methode schneller zu Ergebnissen
 - eingestellt wird die Gleichlösermethode Iterativ

Anzahl Iterationen: - Festlegen der maximalen Anzahl von Rechendurchläufen
- kann nach oben korrigiert werden, falls sich in der Berechnung noch kein Gleichgewicht einstellen konnte.
- eingestellt werden 100 Iterationen

Anzahl Laststeigerungen: - voreingestellt ist 1
wirkt sich nur bei Theorie II. und III. Ordnung aus, indem die Last stückweise auf das System aufgebracht wird und mit der jeweiligen Verformung weitergerechnet wird
- eingestellt werden 10 Laststeigerungen

Plattenbiegetheorie: - Flächen können nach der Biegetheorie nach Mindlin oder nach Kirchhoff berechnet werden
- nach Mindlin werden bei der Berechnung Querkraftverformungen eingeschlossen, nach Kirchhoff nicht
- eingestellt wird Plattenbiegetheorie nach Mindlin

Genauigkeit der Konvergenzschranke: - je größer der eingestellte Wert, desto unempfindlicher ist die Abbruchschranke
- dieser Faktor berücksichtigt auch das Konvergenzkriterium für Verformungsänderungen bei der Berechnung nach Theorie III. Ordnung, die lineare Nichtlinearitäten berücksichtigt
- eingestellte Konvergenzschranke von 10

Alle anderen Einstellmöglichkeiten haben nur Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisverläufe, jedoch nicht auf die Abbruchkriterien.

2.3.3.2 Untersuchung Balkenmodelle

Modelle: - Flächenmodell
- Volumenmodell

Berechnungstheorien: - Theorie I. Ordnung
- Theorie II. Ordnung
- Theorie III. Ordnung
- Durchschlagproblem

Materialmodelle: - Isotrop
- Diagramm
- Plastisch

2.3.3.2.1 Flächenmodell

Einstellwerte: - FE-Netz = 1 mm
- Max. Anzahl Iterationen = 100
- Anzahl Laststeigerungen = 10
- Gleichungslösermethode = Iterativ
- Genauigkeit Konvergenzschranke = 10
- Plattenbiegetheorie = nach Mindlin

Dargestellte Werte in den Tabellen beziehen sich immer auf die maximale Spannung und auf die maximale Verformung.

Linienlast: 10 kN/m

	Isotrop	Diagramm	Plastisch
I. Ordnung	7,40 kN/cm ² 0,21mm	(32,12 kN/cm ²) (418 mm)	7,48 kN/cm ² 0,24mm
II. Ordnung	7,42 kN/cm ² 0,21mm	(24,92 kN/cm ²) (130 mm)	7,50 kN/cm ² 0,24mm
III. Ordnung	7,40 kN/cm ² 0,21mm	(11,80 kN/cm ²) (112 mm)	7,63 kN/cm ² 0,24mm
Durchschlag	7,42 kN/cm ² 0,21mm	(11,88 kN/cm ²) (112 mm)	7,63 kN/cm ² 0,24mm

Handrechnung:

$$I_y = b \cdot h^3 / 12 = \underline{0,083333 \text{ cm}^4}$$

$$M_{\max} = q \cdot l^2 / 8 = \underline{1,25 \text{ kNcm}}$$

$$f = 5/385 \cdot q \cdot l^4 / E \cdot I = \underline{0,226 \text{ mm}}$$

$$\sigma = M \cdot z / I_y = \underline{7,5 \text{ kN/cm}^2}$$

Tabelle 15: Ergebnisse Flächenlast 10 kN/m

Bei den Werten in der Klammer wurde eine Fehlermeldung angezeigt: - Konvergenzkriterium nicht erfüllt!

Die Werte sind ungenau und somit wird bei nachfolgender Laststeigerung das Materialmodell nach dem Diagramm nicht mehr berücksichtigt.

Linienlast: 26,66 kN/m

	Isotrop	Plastisch
I. Ordnung	20,03 kN/cm ² 0,64 mm	20,02 kN/cm ² 0,64 mm
II. Ordnung	20,15 kN/cm ² 0,64 mm	20,13 kN/cm ² 0,64 mm
III. Ordnung	20,16 kN/cm ² 0,65 mm	(23,07 kN/cm ²) (1,26 mm)
Durchschlag	20,16 kN/cm ² 0,65 mm	(59,79 kN/cm ²) (19,63 mm)

Tabelle 16: Ergebnisse Flächenlast 26,66 kN/m

Bei den Werten in der Klammer wurde eine Fehlermeldung angezeigt: - bei Iteration wurde die geforderte Genauigkeit nicht erreicht; Ergebnisse sind nicht verwendbar; kritische Belastung überschritten!

Wird das FE-Netz auf 2 mm eingestellt, zeigt das Programm bei Plastisch nach Theorie III. Ordnung und Durchschlagen Werte ohne Fehlermeldung an.

Maximale Spannung: 20,08 kN/cm²

Maximale Verschiebung: 0,64 mm

Linienlast: 32,00 kN/m

	Isotrop	Plastisch
I. Ordnung	24,04 kN/cm ² 0,77 mm	21,09 kN/cm ² 0,79 mm
II. Ordnung	24,21 kN/cm ² 0,77 mm	21,13 kN/cm ² 0,80 mm
III. Ordnung	24,22 kN/cm ² 0,78 mm	(-) (-)
Durchschlag	24,22 kN/cm ² 0,78 mm	(-) (-)

Tabelle 17: Ergebnisse Flächenlast 32 kN/m

Bei der Berechnung plastisch nach Theorie III. Ordnung wurde die Berechnung abgebrochen. Fehlermeldung: -Steifigkeitsmatrix ist singulär; Struktur ist instabil!

Wird das FE-Netz auf 2 mm eingestellt, zeigt das Programm bei Plastisch nach Theorie III. Ordnung und Durchschlagen Werte ohne Fehlermeldung an.

Maximale Spannung: 22,43 kN/cm²

Maximale Verschiebung: 0,80 mm

Linienlast: 40,00 kN/m

	Isotrop	Plastisch
I. Ordnung	30,05 kN/cm ² 0,96 mm	34,07 kN/cm ² 32,39 mm
II. Ordnung	30,32 kN/cm ² 0,97 mm	(-) (-)
III. Ordnung	30,33 kN/cm ² 0,97 mm	(-) (-)
Durchschlag	30,33 kN/cm ² 0,97 mm	(34,07 kN/cm ²) (27,98 mm)

Tabelle 18: Ergebnisse Flächenlast 40 kN/m

Bei der Berechnung plastisch nach Theorie II. und III. Ordnung wurde die Berechnung abgebrochen. Fehlermeldung: -Steifigkeitsmatrix ist singulär; Struktur ist instabil!

Wird das FE-Netz auf 2 mm eingestellt, zeigt das Programm bei Plastisch nach Theorie I. Ordnung Fehlermeldung an: Kritische Belastung überschritten, Interaktion konvergiert nicht

Wird das FE-Netz auf 5 mm eingestellt, zeigt das Programm bei Plastisch nach Theorie I. Ordnung Werte ohne Fehlermeldung an.
 Maximale Spannung: 24,40 kN/cm²
 Maximale Verschiebung: 0,93 mm

Wird das FE-Netz auf 3 mm eingestellt, zeigt das Programm bei Plastisch nach Theorie II. Ordnung Werte ohne Fehlermeldung an.
 Maximale Spannung: 24,34 kN/cm²
 Maximale Verschiebung: 0,95 mm

Bei Theorie III. Ordnung Plastisch wird die Berechnung auch abgebrochen, wenn FE-Netz = 10 mm eingestellt ist.

2.3.3.2.2 Volumenmodell

Einstellwerte:

- FE-Netz = 2 mm (aufgrund Rechenzeit)
- Max. Anzahl Iterationen = 100
- Anzahl Laststeigerungen = 10
- Gleichungslösermethode = Iterativ
- Genauigkeit Konvergenzschranke = 10
- Plattenbiegetheorie = nach Mindlin

Dargestellte Werte in den Tabellen beziehen sich immer auf die maximale Spannung und auf die maximale Verformung.

Volumenlast: 1000 kN/m²

	Isotrop	Diagram	Plastisch
I. Ordnung	7,47 kN/cm ² 0,24mm	Material nicht Isotrop	Material nicht Isotrop
II. Ordnung	7,48 kN/cm ² 0,24mm	Material nicht Isotrop	Material nicht Isotrop
III. Ordnung	7,49 kN/cm ² 0,24mm	Material nicht Isotrop	Material nicht Isotrop
Durchschlag	7,49 kN/cm ² 0,24mm	Material nicht Isotrop	Material nicht Isotrop

Tabelle 19: Ergebnisse Volumenlast 1000 kN/m²

Das Volumenmodell kann nur mit dem Materialmodell Isotrop berechnet werden. Alle anderen Einstellungen sind mit diesem Programm nicht möglich.

In der weiteren Untersuchung wird nur noch mit dem Materialmodell Isotrop gerechnet.

Volumenlast: 2660 kN/m²

	Isotrop
I. Ordnung	19,88 kN/cm ² 0,63mm
II. Ordnung	20,00 kN/cm ² 0,64mm
III. Ordnung	19,98 kN/cm ² 0,64mm
Durchschlag	19,98 kN/cm ² 0,64mm

Tabelle 20: Ergebnisse Volumenlast 2660 kN/m²

Volumenlast: 3200 kN/m²

	Isotrop
I. Ordnung	23,91 kN/cm ² 0,76mm
II. Ordnung	24,01 kN/cm ² 0,77mm
III. Ordnung	24,05 kN/cm ² 0,77mm
Durchschlag	24,05 kN/cm ² 0,77mm

*Tabelle 21: Ergebnisse Volumenlast 3200 kN/m²***Volumenlast: 4000 kN/m²**

	Isotrop
I. Ordnung	29,89 kN/cm ² 0,95mm
II. Ordnung	30,04 kN/cm ² 0,96mm
III. Ordnung	30,10 kN/cm ² 0,96mm
Durchschlag	30,10 kN/cm ² 0,96mm

Tabelle 22: Ergebnisse Volumenlast 4000 kN/m²

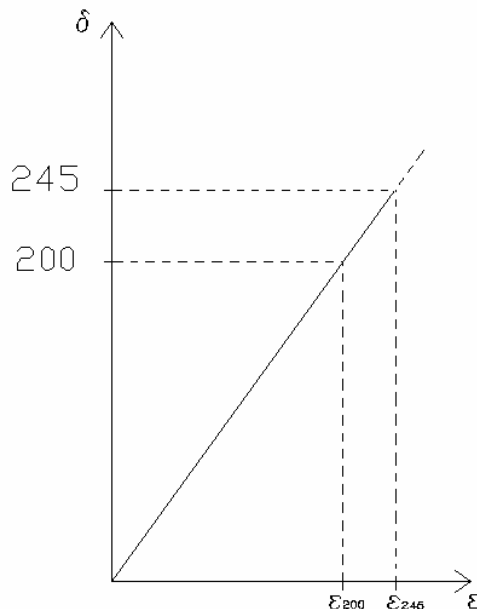
2.3.3.3 Auswertung und Zusammenfassung Balkenmodelle

Auswertung

Materialmodell Diagramm kann bei der Berechnung mit RFEM nicht verwendet werden. Die Ergebnisse beim Flächenmodell sind ungenau bzw. viel zu hoch und es wurde eine Fehlermeldung angezeigt. Beim Volumenmodell war es nicht möglich, eine Berechnung durchzuführen. Die Berechnung konnte nicht gestartet werden.

Es ist davon auszugehen, dass im Programm RFEM ein Programmierungsfehler vorliegt.

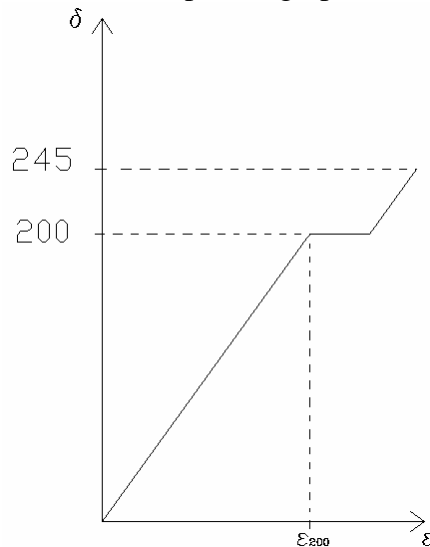
- Die Berechnung mit dem Materialmodell Isotrop ist die genaueste, da die Ergebnisse am einfachen Modell gut nachvollziehbar sind. Auch Änderungen am FE-Netz beeinflussen die Ergebnisse nur sehr gering.
- Es kann das Flächenmodell und das Volumenmodell mit dem Materialmodell Isotrop berechnet werden
- Problem: Die Spannungen werden ausschließlich im elastischen Bereich bestimmt. Das heißt, es wird angenommen dass der Werkstoff unendlich elastisch ist.



- der plastische Bereich des Aluminiumwerkstoffes über $\sigma > 200 \text{ N/mm}^2$ wird beim Materialmodell Isotrop komplett vernachlässigt
- Spannungsspitzen werden nicht durch plastische Verformung abgebaut
- dadurch wird bei der Berechnung der Spannungen sehr schnell die Zugfestigkeitsgrenze von $\sigma > 245 \text{ N/mm}^2$ erreicht

Abbildung: 51: Isotropes Materialmodell

- Die Berechnung mit dem Materialmodell Plastisch nach Mises ist nur mit dem Flächenmodell möglich
- ab der Streckgrenze von $\sigma > 200 \text{ N/mm}^2$ verformt sich das Material plastisch
- somit werden Spannungsspitzen abgebaut



- ist die Streckgrenze von $\sigma = 200 \text{ N/mm}^2$ erreicht, verformt sich der Werkstoff plastisch
- erst wenn das Material komplett plastisch verformt ist, steigt die Spannung weiter bis zur Zugfestigkeitsgrenze von $\sigma = 245 \text{ N/mm}^2$ an
- ist diese Grenze erreicht, bricht das Programm die Berechnung ab oder es kommt eine Fehlermeldung, da der Werkstoff versagt

Abbildung 52: Plastisches Materialmodell

Problem1: -Die berechneten Verformungen sind beim Materialmodell Plastisch genau so groß wie die beim Materialmodell Isotrop. Egal ob nach Theorie I. Ordnung, nach Theorie II. Ordnung oder nach Theorie III. Ordnung gerechnet wird. Eigentlich bildet sich durch die plastische Verformung an der Unterseite des Balkens ein Fließgelenk aus, was eine größere Verformung hervorrufen sollte. Dies ist aber nicht der Fall.

Problem 2: - die genaue Einstellung des FE-Netzes ist für die Genauigkeit der Ergebnisse wichtig. Ein zu feines FE-Netz führt zu Fehlermeldungen, bei einem zu groben FE-Netz werden zu ungenaue Ergebnisse errechnet.

Beispiel: Flächenbalken; Linienlast 40 kN/m ; Materialmodell Plastisch;
Berechnung nach Theorie I.Ordnung

FE-Netz = 1 mm : - maximale Spannung $34,07 \text{ kN/cm}^2$
- maximale Verformung $32,39 \text{ mm}$

FE-Netz = 2 mm : - Fehlermeldung an: Kritische Belastung überschritten, Interaktion konvergiert nicht

FE-Netz = 5 mm : - maximale Spannung $24,40 \text{ kN/cm}^2$
- maximale Verformung $0,93 \text{ mm}$

An diesem Beispiel ist zu erkennen, dass die Einstellung des FE-Netzes von großer Bedeutung ist. An diesem einfachen Balkenmodell sind die Ergebnisse nachvollziehbar, allerdings ist das bei komplexeren Modellen nicht mehr möglich. Die Wahrscheinlichkeit von fehlerhaften Ergebnissen ist groß.

Zusammenfassung Auswertung Balkenmodelle

Aufgrund der Ergebnisse mit dem vereinfachten Balkenmodell werden für die weitere Untersuchung der Aluminiumwinkel folgende Festlegungen getroffen.

Geometrie: - Aluminiumwinkel wird aus Flächen modelliert

- die Modellierung aus Volumen ist umfangreicher und die Berechnung komplexer

Werkstoff: - der angepasste Werkstoff EN AW 6063 T66 kann im Programm eingestellt werden und die Berechnung damit durchgeführt werden

Materialmodell: - die Berechnung wird mit dem Materialmodell Isotrop durchgeführt

- die Aluminiumwinkel können mit diesem Modell bis zur Streckgrenze untersucht werden

FE-Netz: - kann bei isotropen Materialmodell an den kritischen Stellen sehr fein eingestellt werden

- Ergebnisse werden umso genauer

Berechnungstheorie: - Berechnung nach Theorie II. Ordnung, damit bei den eingestellten Laststeigerungen die Imperfektionen während der Berechnung berücksichtigt werden

Gleichlösermethode: Iterativ

Anzahl Iterationen: 100

Anzahl Laststeigerungen: 10

Plattenbiegetheorie: nach Mindlin

Konvergenzschranke: 10

2.3.4 Eingabe der Aluminiumwinkel

2.3.4.1 Topologie

a) Geometrie

Eingabe der Koordinaten gemäß den Abmessungen des Winkels in das Programm. Der weitere Verlauf der Eingabe wird nur auf den Winkel L120-3 bezogen.

L 120mm x 40mm x 3mm

	x-Achse	y-Achse	z-Achse
Punkt 1	0.0	0.0	0.0
Punkt 2	160.0	0.0	0.0
Punkt 3	0.0	38.5	0.0
Punkt 4	160.0	38.5	0.0
Punkt 5	0.0	0	0.0
Punkt 6	160.0	0	0.0
Punkt 7	0.0	0	-118.5
Punkt 8	160.0	0	-118.5

Tabelle 23: Punktkoordinaten

Die einzelnen Punkte werden zu Flächen verbunden. Fläche1 entsteht aus Punkt 1-4 und wird mit einer konstanten Materialdicken von 3mm eingegeben. Fläche2 entsteht aus Punkt 5-8 mit einer konstanten Materialdicken von 3mm. Beide Flächen sind Biegesteif an der Ecke miteinander verbunden.

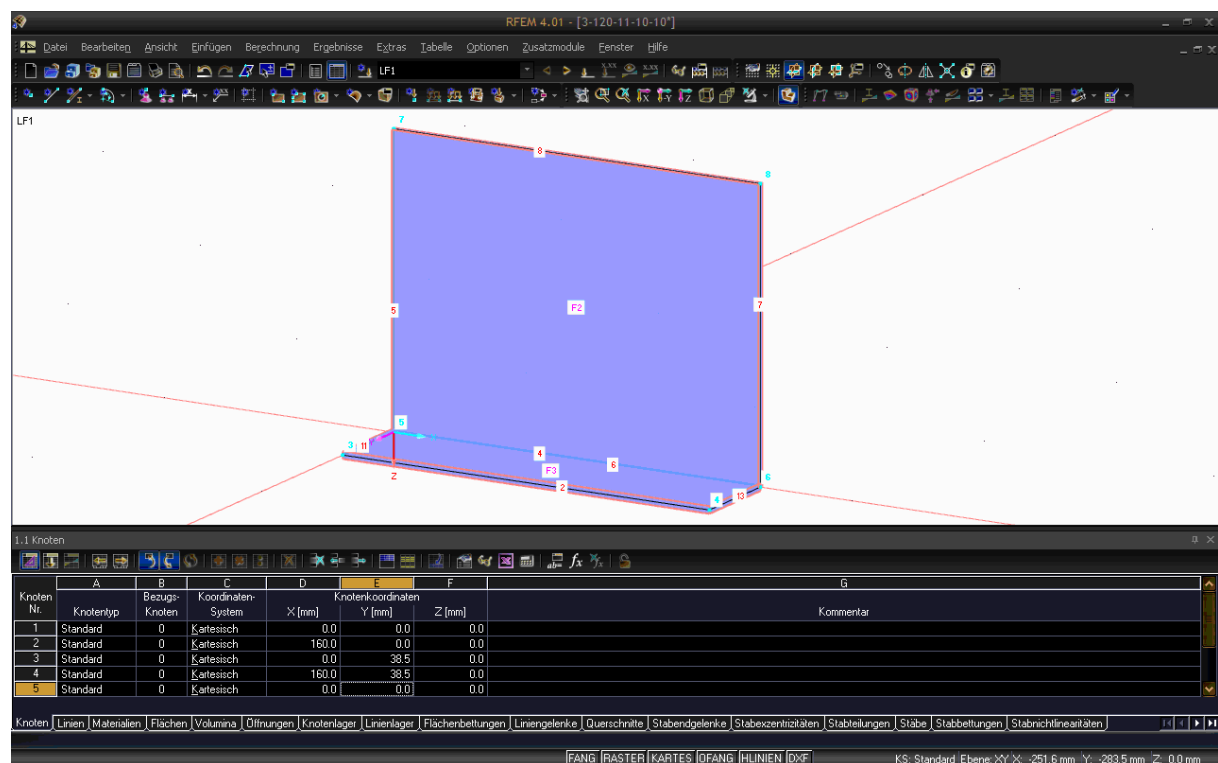


Abbildung 53: RFEM Rohwinkel

Darstellung des Winkels in 3D-Einstellung. Fläche wird als Volumenkörper dargestellt. Dabei fällt auf, dass die Ecke unvollständig dargestellt ist.

Problem: Beeinflusst diese unvollständig dargestellte Ecke die Berechnung?

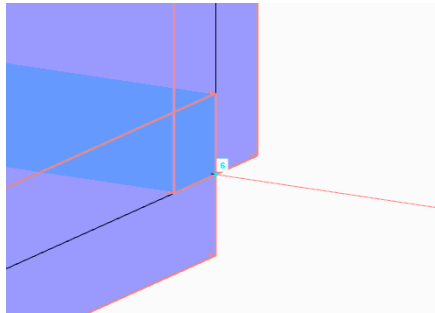


Abbildung 54: Skizze Ecke

Um dieses Problem zu lösen, wird eine vereinfachte Probestruktur mit RFEM4 durchgeführt.

Dabei wird die Verformung des Winkels bei 15kN Zuglast verglichen. Zugkraft wirkt als Linienkraft am oberen Ende des langen Schenkels. Lagerung der Winkel am Ende des kurzen Schenkels mit Festlager. Als Material wird das im Programm gespeicherte Aluminium EN AW-6063 (ET,EP,ER/B) T6 eingesetzt. Berechnung nach Theorie 1.Ordnung.

1. Berechnung: - Eingabe der Koordinaten wie im Punkt 2.3.3.1 dargestellt.

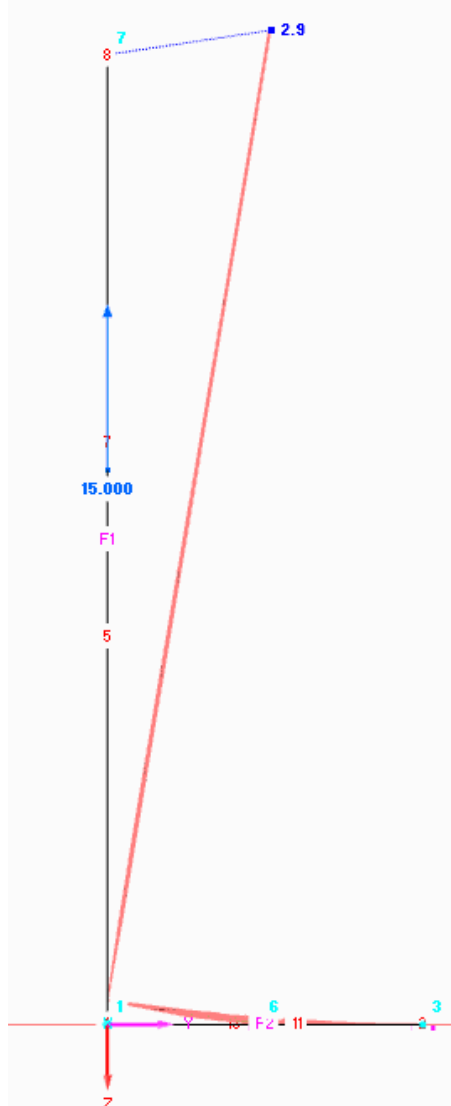


Abbildung 56: Verformungsbild

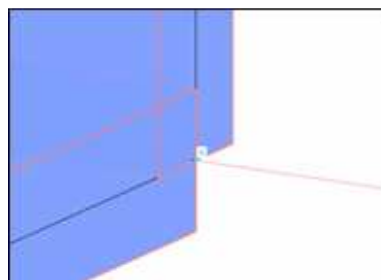


Abbildung 55: Skizze Ecke

- Verschiebung des oberen Punktes um 2.9mm in y-Richtung und -0,4mm in z-Richtung

Einfügen der Öffnungen:

Kreisausschnitt mit Durchmesser von 18mm.

Langlöcher mit einer Länge von 20mm und einer Breite von 10mm

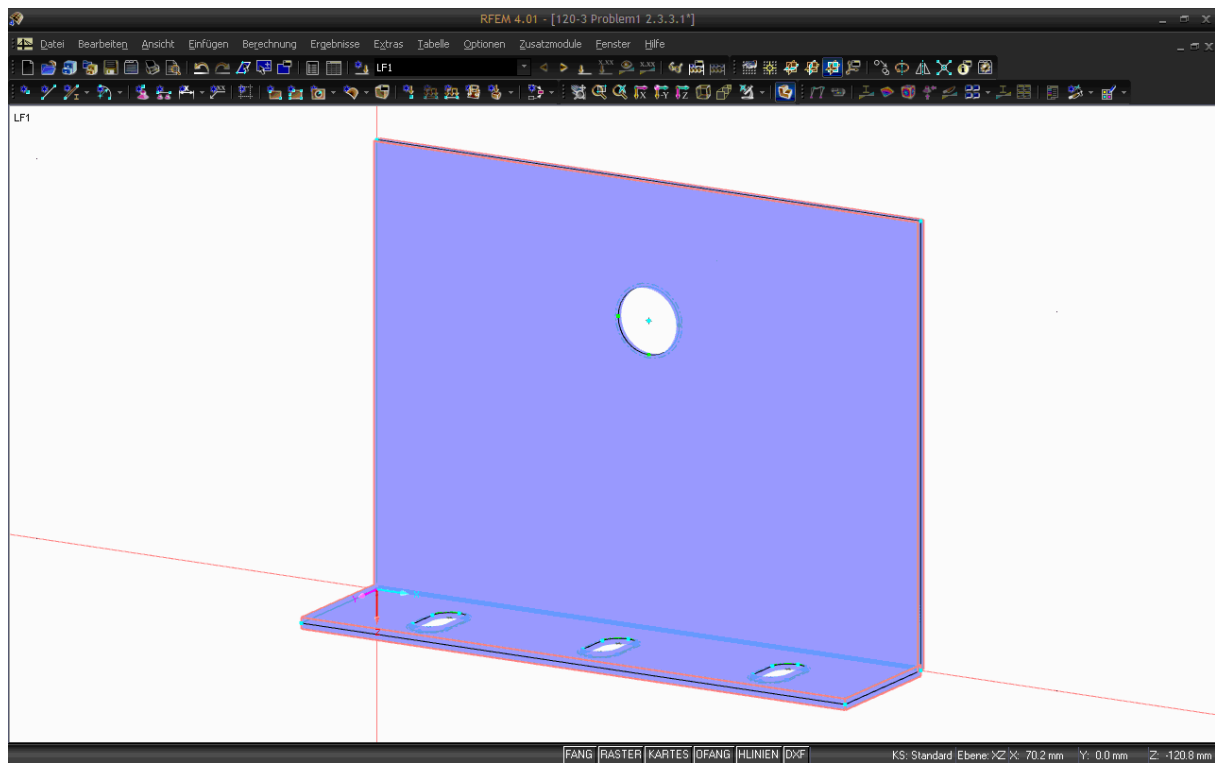


Abbildung 59: Öffnungen

b) Werkstoffe

Im Menü „Fläche bearbeiten“ werden die gespeicherten Materialkennwerte vom Aluminiumwerkstoff AW-6063 T66 eingeladen. Die Materialkennwerte wurden im Punkt 2.3.3.1.2 definiert. Materialdicke wird je nach Winkel auf 3mm, 4mm oder 4,5mm eingestellt.

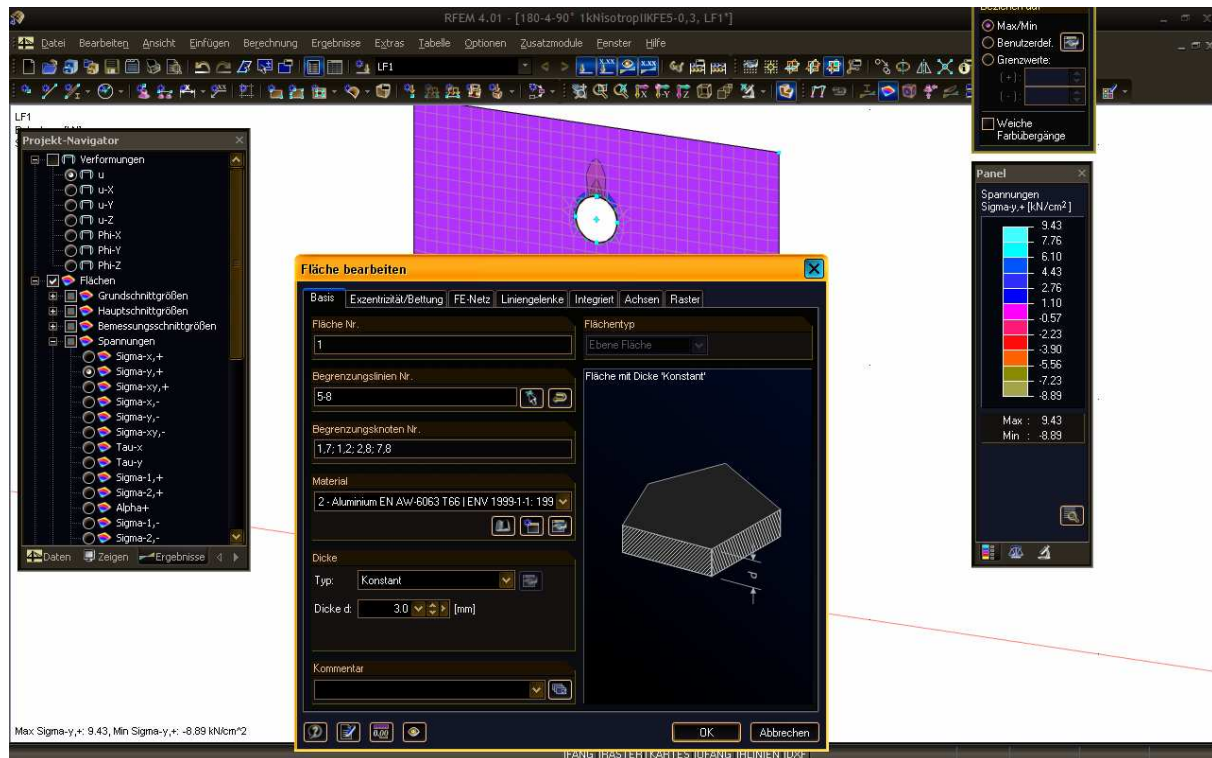
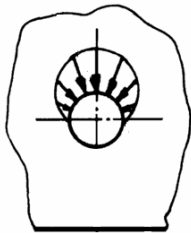


Abbildung 60: Materialeinstellung

2.3.4.2 Aspekte zur Lasteintragung

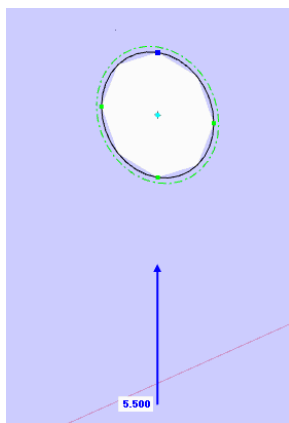
Es werden Zuglasten von 0,5kN bis 10kN in 0,5kN Schritten simuliert. Sollte die Streckgrenze des Werkstoffes erreicht sein, wird die Zuglast nicht weiter gesteigert. Die Verformung und die Spannungen während der jeweiligen Belastung werden dokumentiert und können später mit den Werten aus den realen Versuchen verglichen werden.

Lasteinleitung in den Winkel: - wird die Last über einen Bolzen in den Werkstoff eingeleitet, entsteht folgende Lochleibungsspannung (Abbildung 61).



- Diese Lochleibungsspannung mit dem Programm zu simulieren ist mit dem Flächenmodell nicht möglich

Abbildung 61: Lochleibungsspannung



- Eingabe der Last erfolgt als Linienlast mit punktuellm Kraftverlauf. Diese Linienlast wirkt auf den oberen Punkt des Kreisausschnittes (Abbildung 62)
- diese Eingabe erleichtert die Simulation der schräg angreifenden Zugkräfte
- evtl. auftretende Spannungsspitzen im Bereich der Krafteinleitung werden vernachlässigt

Abbildung 62: Linienlast mit punktuellm Kraftverlauf

Bsp: 0,5kN Zugkraft

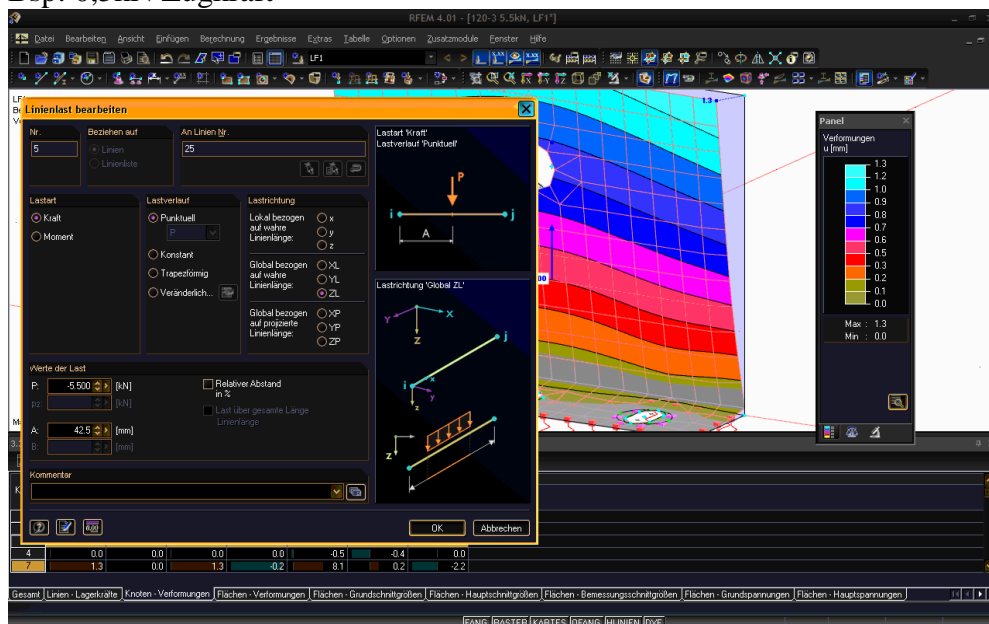


Abbildung 63: Linienlast

Eingabe der Lastwinkel

Eingabe der Zugkraft

Um einen Lastangriffswinkel von 60° und 45° zu simulieren, wird die schräge Zugkraft in eine horizontale und in eine vertikale Kraft zerlegt. Der Einleitungspunkt verschiebt sich wie in Abbildung 64.

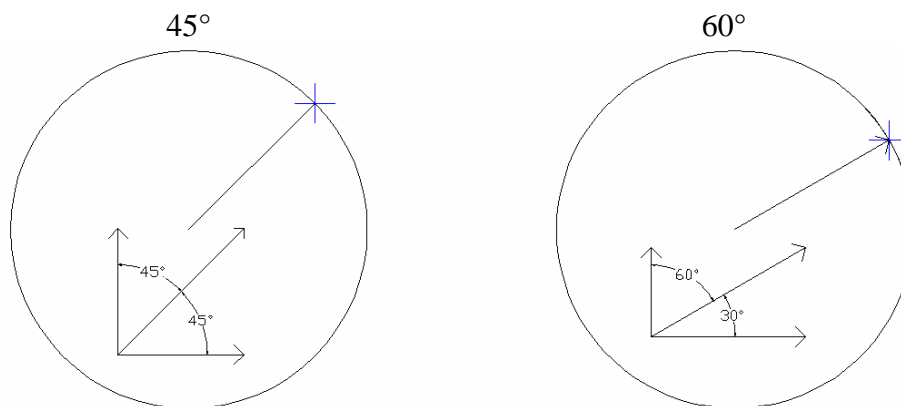


Abbildung 64: Lastwinkel

45°	horizontaler Anteil	vertikaler Anteil	60°	horizontaler Anteil	vertikaler Anteil
0,5 kN	0,35355 kN	0,35355 kN	0,5 kN	0,433	0,25
1 kN	0,707 kN	0,707 kN	1 kN	0,866	0,5
1,5 kN	1,06066 kN	1,06066 kN	1,5 kN	1,299	0,75
2 kN	1,4142 kN	1,4142 kN	2 kN	1,732	1
2,5 kN	1,7677 kN	1,4142 kN	2,5 kN	2,165	1,25

Tabelle 24: Zugkraftanteile

Beispiel: $F=0,5\text{kN}$; Lasteinleitung 60°

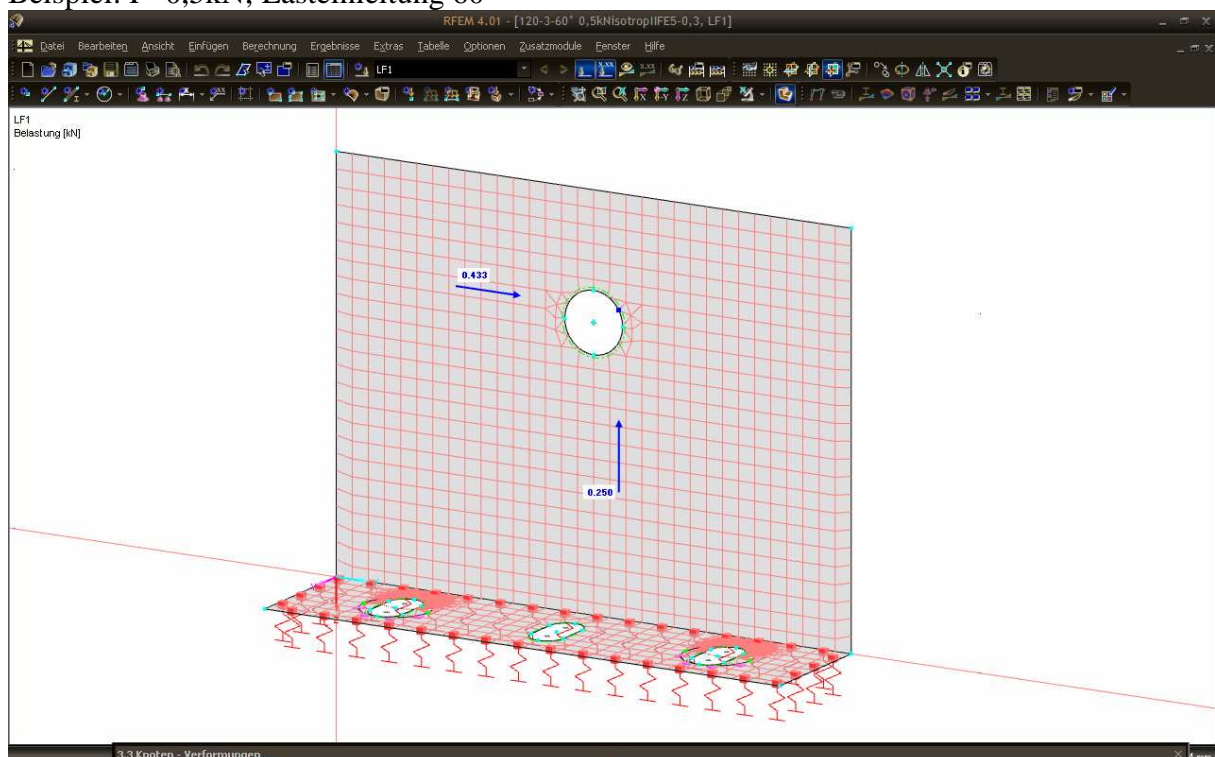


Abbildung 65: Lasteinleitung 60°

2.3.4.3 Lagerung des Winkels

Der Kontakt zwischen Aluminiumwinkel und Stahlunterkonstruktion wird durch eine Flächenbettung simuliert. Dazu wird die Wegfeder in Z-Richtung als unendlich angenommen, da die Stahlkonstruktion am Versuchsstand nicht nachgiebig ist. Der größte Wert den man in dem Programm einstellen kann ist $C_{1,z}=2 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^3$.

Zum Vergleich eine Übersicht von *KOLAR* mit Orientierungswerten bei der Simulation von Stahlplatte auf Erdreich.

KOLAR [18] führt hierzu eine zusammenfassende Tabelle mit Orientierungswerten an:

Bodenkonsistenz	$C_{1,z}$	Schubtragwirkung C_2		
		keine	mittel	groß
	[kN/m ²]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]
sehr weich	1 000	0	500	1 000
mitteldicht	10 000	0	5 000	10 000
dicht	100 000	0	50 000	100 000

Tabelle 25: Orientierungswerte

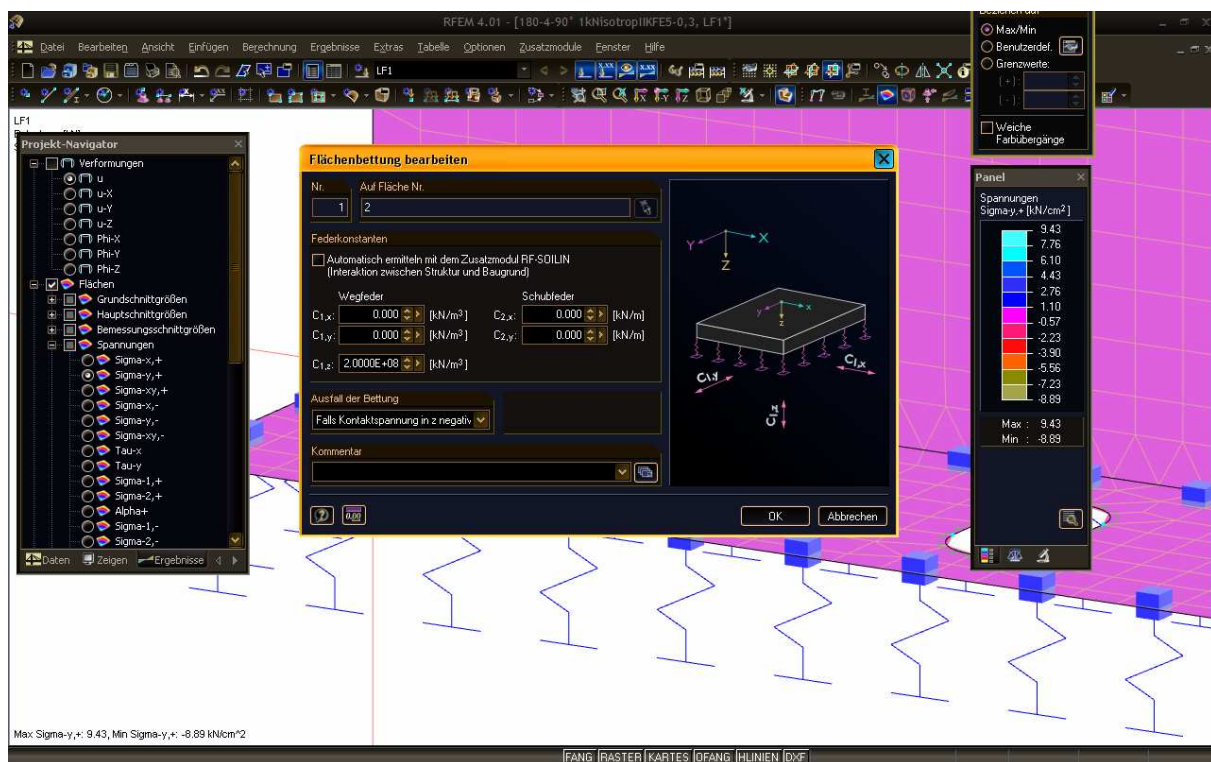


Abbildung 66: Flächenbettung

Wichtig ist noch, dass der Ausfall der Bettung in negative z-Richtung eingestellt ist!

Weitere Randbedingungen

Simulation der Schraubverbindung zwischen Aluminiumwinkel und Stahlunterkonstruktion. Schraubverbindung mit Unterlegscheibe Durchmesser 20mm wird als festes Linienlager um das Langloch simuliert.

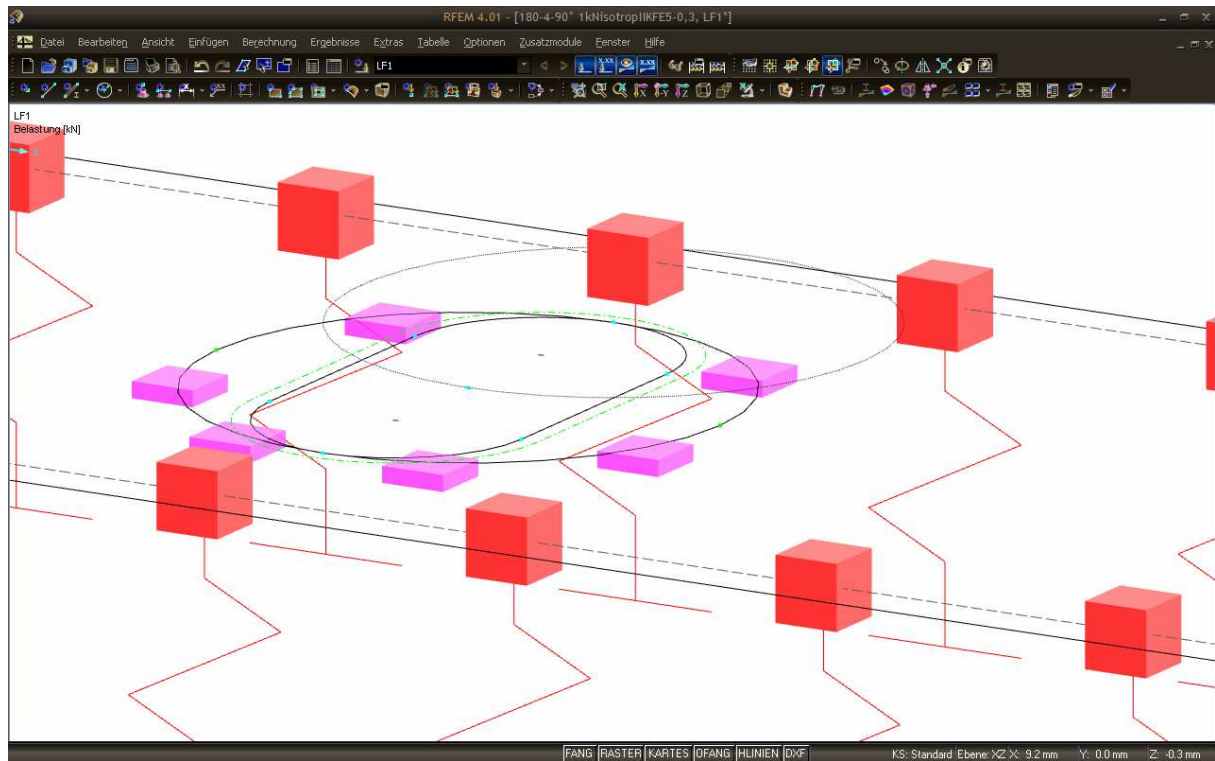


Abbildung 67: Simulation Schraubverbindung

2.3.4.4 FE-Netz regenerieren

Für die Berechnung der Spannungen muss ein FE-Netz regeneriert werden. Je dichter das Netz, desto genauer sind die Ergebnisse. Jedoch wird die Berechnung mit jeder Verdichtung komplexer und dauert demnach länger.

Für den groben Überblick über die Spannungen und deren Verläufe wurde zunächst ein FE-Netz mit einer Finiten-Element-Länge von 5mm gewählt.

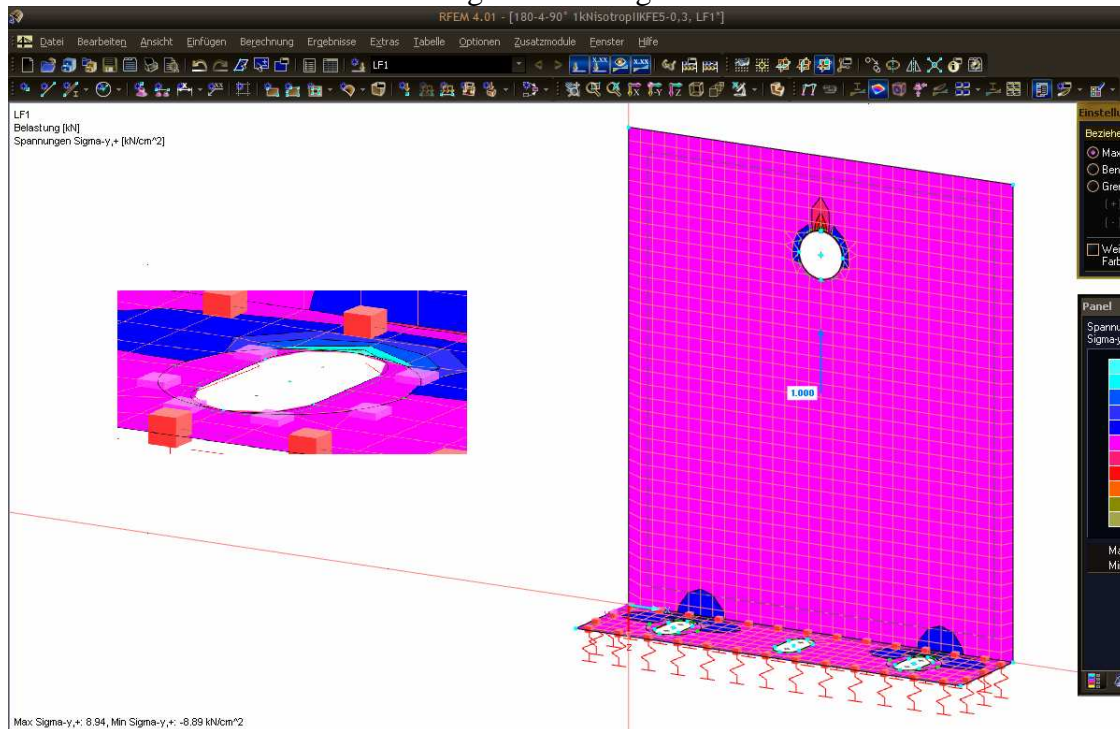


Abbildung 68: FE-Netzverdichtung

In Abbildung ist zu erkennen, dass der Bereich am Langloch des Winkels die größten Sigma y_+ Spannungen aufweisen. $\text{Sigma } y_{\text{max}} = 30,29 \text{ kN/cm}^2$

Um diese Stelle genauer untersuchen zu können wird das FE-Netz verdichtet. Es ist auch möglich das Netz des ganzen Winkels zu verdichten, allerdings wird die Rechnung dadurch nur komplexer.

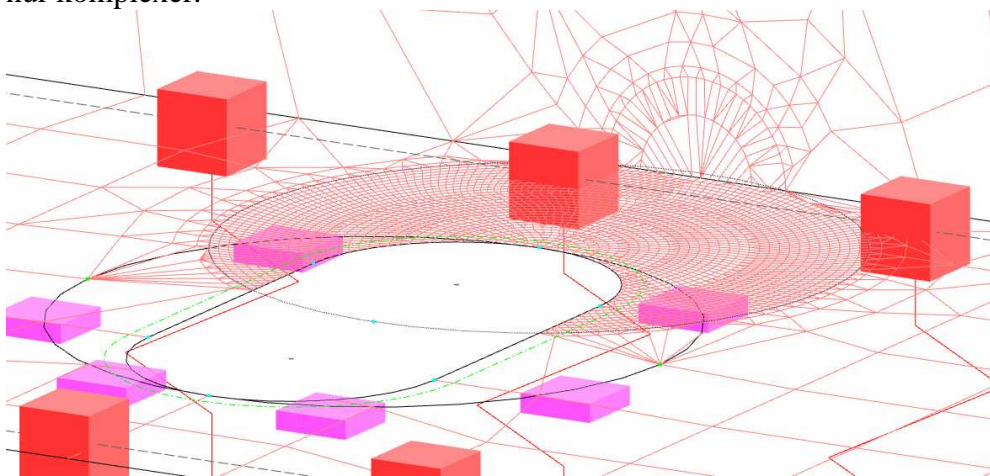


Abbildung 69: Detail FE-Netz

In Abbildung wurde eine Finiten-Element-Länge von 0,3mm regeneriert. Eine weitere Verdichtung des Netzes ist nicht möglich.

2.3.3.5 Weitere Programmeinstellungen

Wie im Punkt 2.3.3.2.1 schon beschrieben, werden weitere Einstellungen vorgenommen.

Materialmodell: - die Berechnung wird mit dem Materialmodell Isotrop durchgeführt
- die Aluminiumwinkel können mit diesem Modell bis zur Streckgrenze untersucht werden

Berechnungstheorie: - Berechnung nach Theorie II. Ordnung, damit bei den eingestellten Laststeigerungen die Imperfektionen während der Berechnung berücksichtigt werden

Gleichlösermethode: Iterativ

Anzahl Iterationen: 100

Anzahl Laststeigerungen: 10

Plattenbiegetheorie: nach Mindlin

Konvergenzschranke: 10

2.3.4 Auswertung der RFEM-Ergebnisse

Die Berechnung wird auch mit den Laststeigerungen von 0,5 bis 10 kN durchgeführt und die maximalen Spannungen und maximalen Verformungen aufgezeichnet. Ist die Streckgrenze von 20 kN/cm^2 überschritten, wird die Last nicht weiter gesteigert.

Bsp. L120-3 Zugkraft 1kN

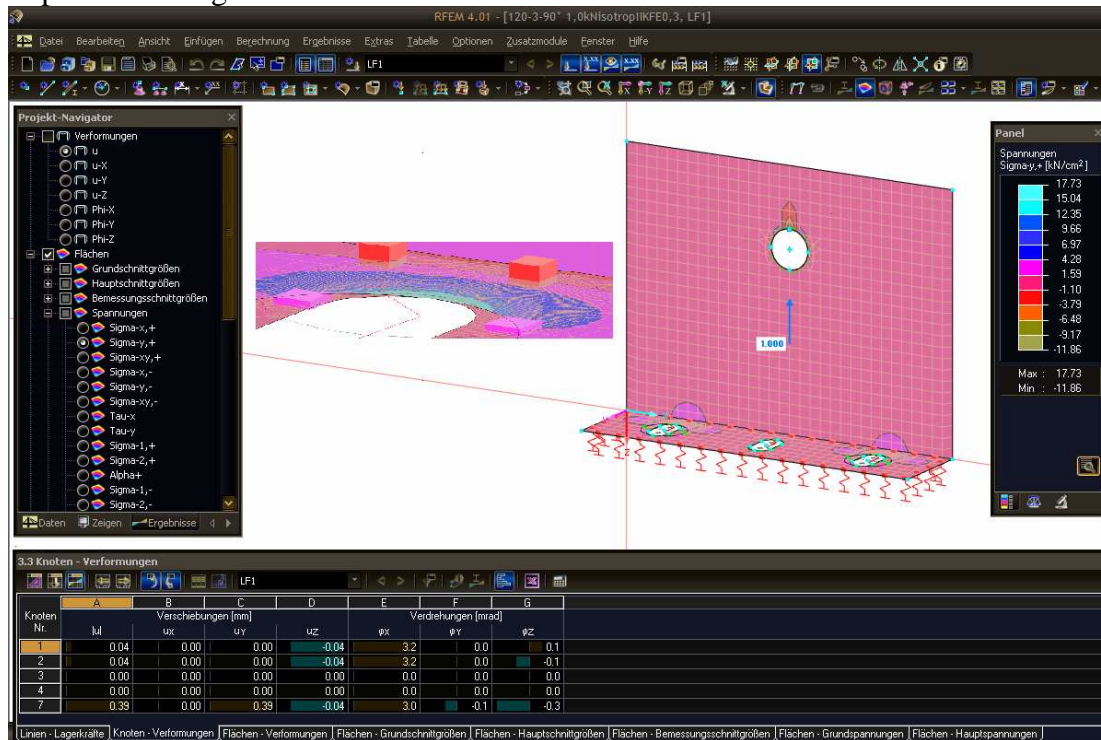


Abbildung 70: Maximale Spannungen

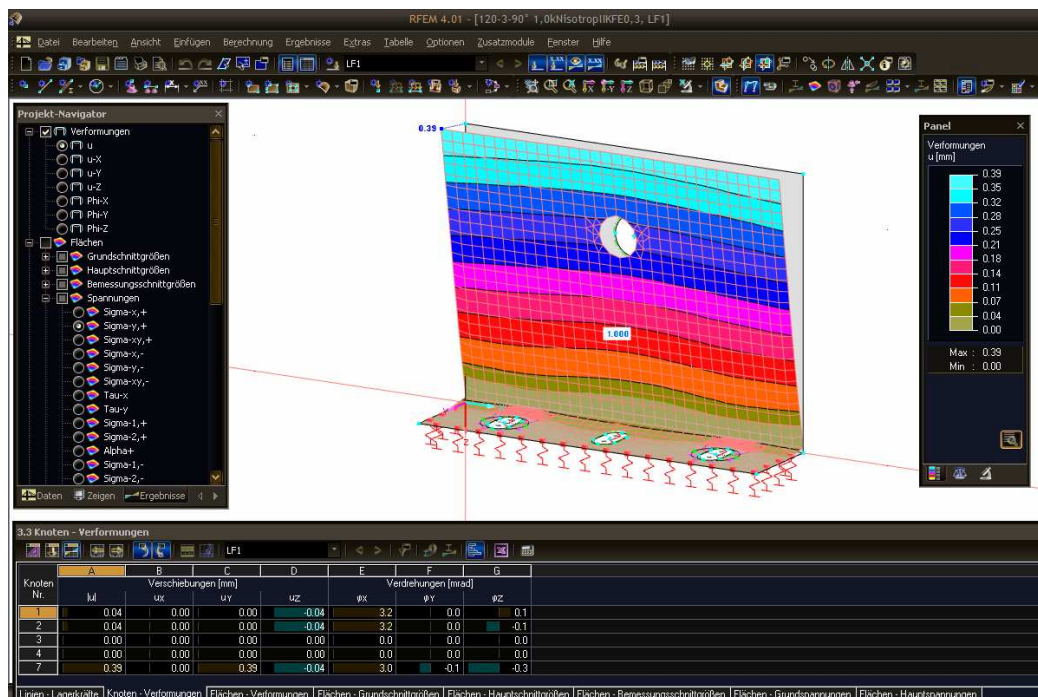


Abbildung 71: Maximale Verformungen

Die maximale Spannung ist $17,73 \text{ kN/cm}^2$, die maximale Verformung in y-Richtung ist $0,39 \text{ mm}$ und die maximale Verformung in z-Richtung $0,04 \text{ mm}$.

3 Ergebnisse der praktischen Untersuchung

3.1 Allgemeines

Wie im Punkt 2.2.8 schon kurz erläutert, können aus diesen Diagrammen das Verformungsverhalten der Aluminiumwinkel abgelesen werden.

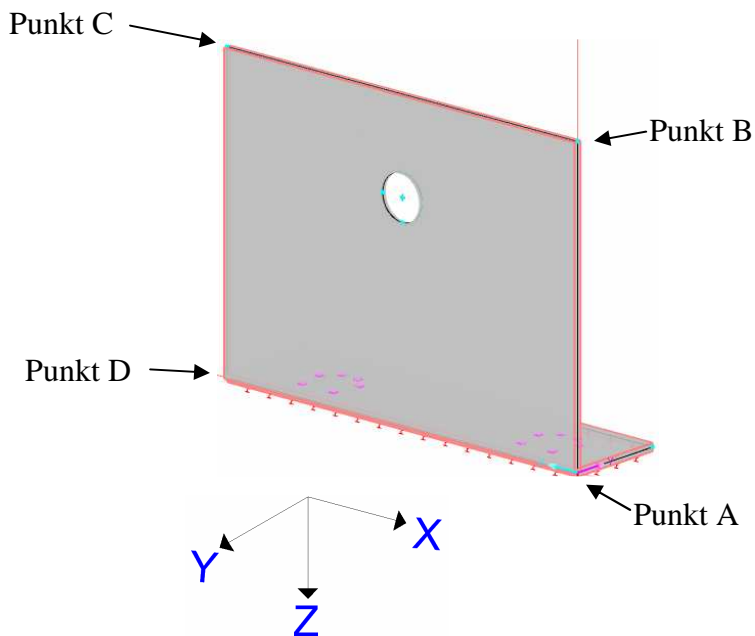
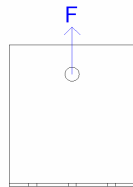


Abbildung 71a: Detail Winkel

Anhand des Diagramms (Abbildung 72) kann man feststellen, dass der L120-3-90° sich schon bei der kleinsten Kraft von 0,5 kN dauerhaft verformt. Punkt B und C gehen nach der Belastung von 0,5 kN nicht mehr in die Ausgangssituation zurück und sind ca. 0,1 mm in die negative Y-Richtung verformt. Sollten die Befestigungswinkel durch spezielle Konstruktionen gegen Ausweichen in y-Richtung gesichert sein, kann der Winkel eine höhere Zugbelastung v abtragen ohne dass er sich in z-Richtung dauerhaft verformt.

Die Tabellen unterhalb der Diagramme sind die Anfangswerte der Diagramme. Diese Zahlenwerte werden bei der Zusammenfassung bzw. beim Vergleich der Verformungswerte mit den Ergebnissen aus der Berechnung mit RFEM noch benötigt.

3.2 Krafteinleitung 90°



3.2.1 Winkel 120mm hoch, Wandstärke 3mm

L120-3-90°

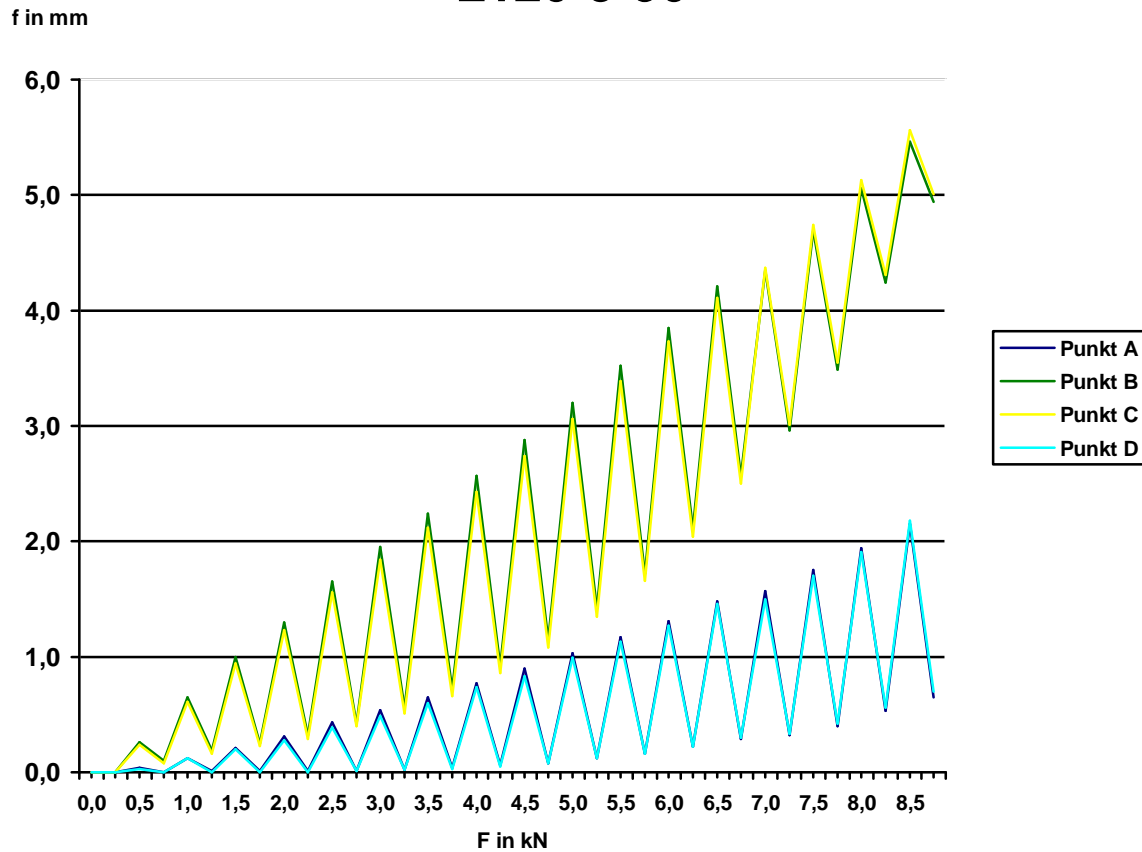
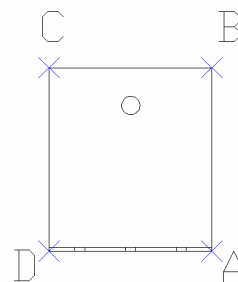


Abbildung 72: Diagramm L120-3-90°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C	Punkt D
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,04	0,26	0,24	0,03
0	0,00	0,10	0,08	0,00
1	0,12	0,65	0,61	0,12
0	0,01	0,19	0,16	0,00
1,5	0,21	1,00	0,94	0,20
0	0,01	0,25	0,23	0,00

Tabelle 26: Anfangswerte Diagramm L120-3-90°



3.2.2 Winkel 160mm hoch, Wandstärke 3mm

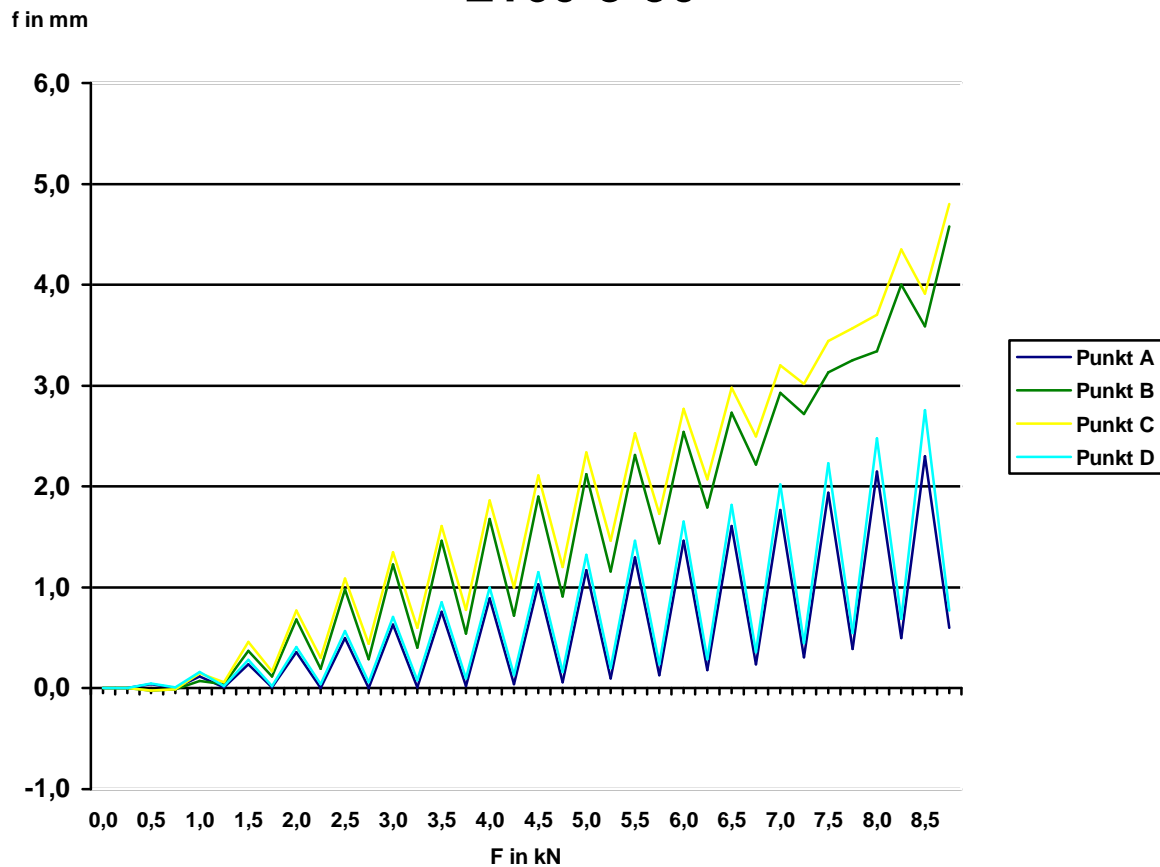
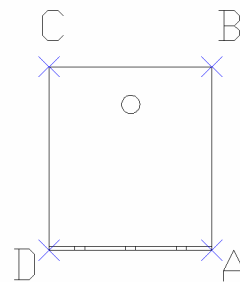
L160-3-90°

Abbildung 73: Diagramm L160-3-90°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C	Punkt D
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,04	-0,02	-0,02	0,05
0	0,00	-0,01	-0,01	0,01
1	0,12	0,07	0,15	0,16
0	0,01	0,04	0,06	0,02
1,5	0,24	0,37	0,46	0,28
0	0,01	0,12	0,17	0,02

Tabelle 27: Anfangswerte Diagramm L160-3-90°



3.2.3 Winkel 180mm hoch, Wandstärke 4mm

L180-4-90°

f in mm

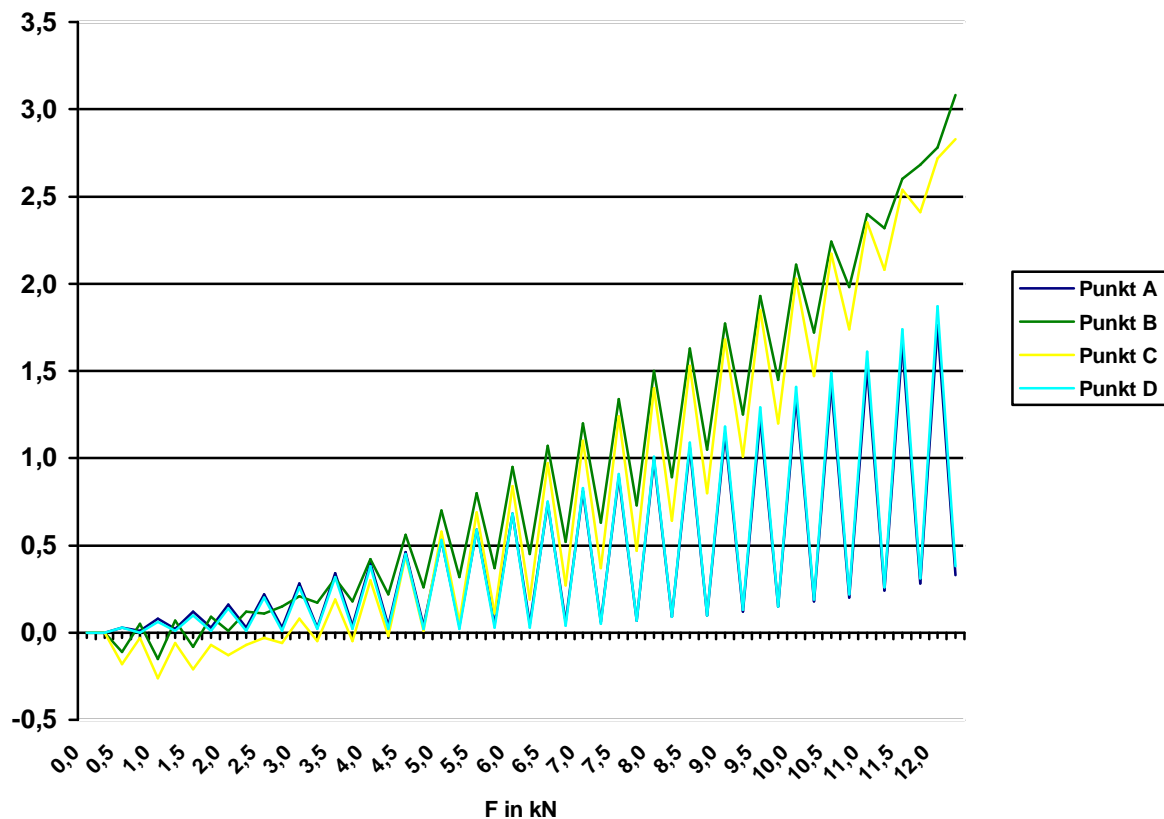


Abbildung 74: Diagramm L180-4-90°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C	Punkt D
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,03	-0,11	-0,18	0,03
0	0,01	0,05	-0,03	0,00
1	0,08	-0,15	-0,26	0,06
0	0,02	0,07	-0,06	0,01
1,5	0,12	-0,08	-0,21	0,10
0	0,03	0,09	-0,07	0,01
2	0,16	0,01	-0,13	0,14
0	0,03	0,12	-0,07	0,01
2,5	0,22	0,11	-0,03	0,20
0	0,03	0,15	-0,06	0,01

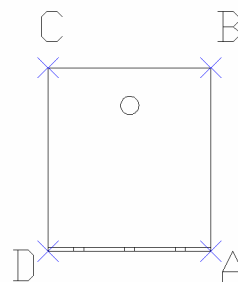


Tabelle 28: Anfangswerte Diagramm L180-4-90°

3.2.4 Winkel 210mm hoch, Wandstärke 4mm

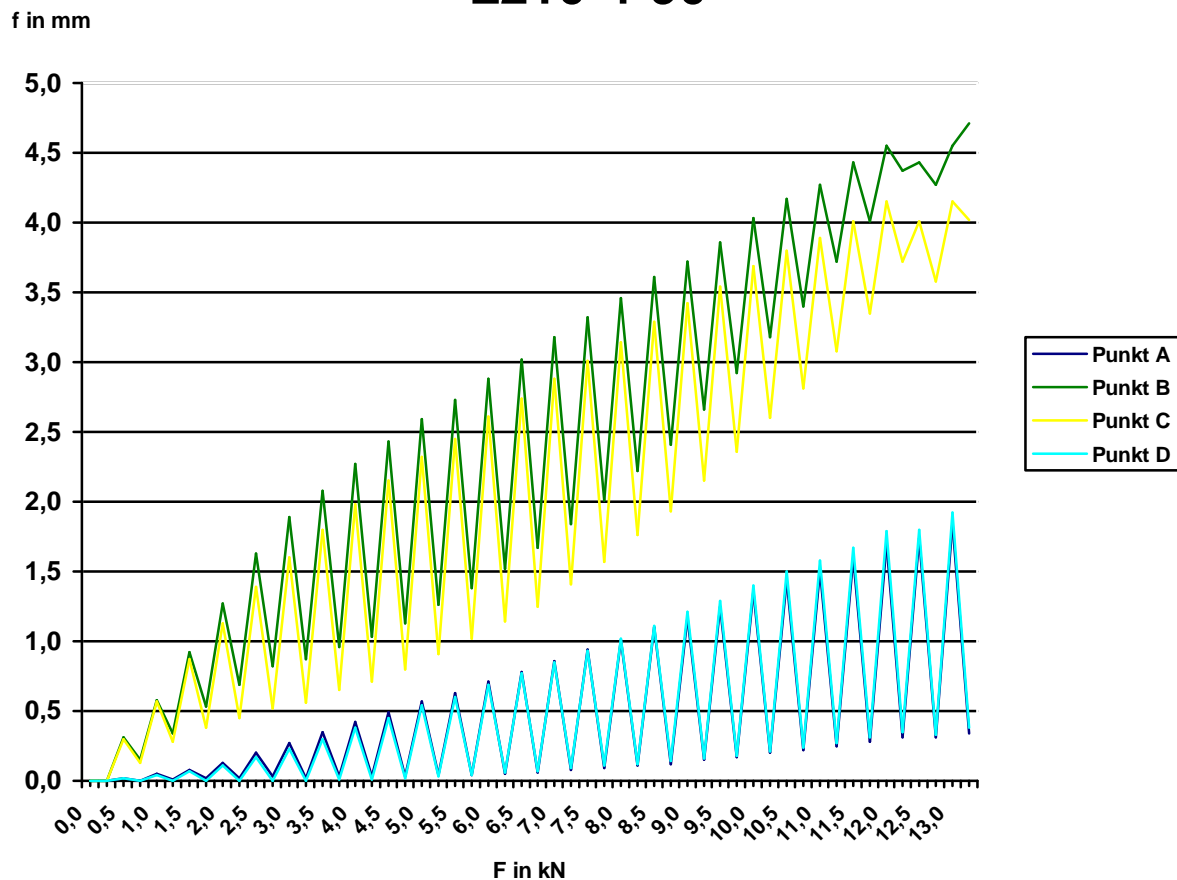
L210-4-90°

Abbildung 75: Diagramm L210-4-90°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C	Punkt D
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,02	0,31	0,30	0,02
0	0,00	0,15	0,13	0,00
1	0,05	0,58	0,57	0,04
0	0,01	0,34	0,28	0,00
1,5	0,08	0,92	0,87	0,07
0	0,02	0,53	0,38	0,00
2	0,13	1,27	1,13	0,11
0	0,02	0,69	0,45	0,00
2,5	0,20	1,63	1,39	0,17
0	0,03	0,82	0,52	0,00

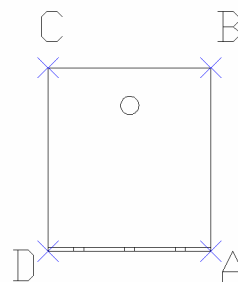


Tabelle 29: Anfangswerte Diagramm L210-4-90°

3.2.5 Winkel 230mm hoch, Wandstärke 4mm

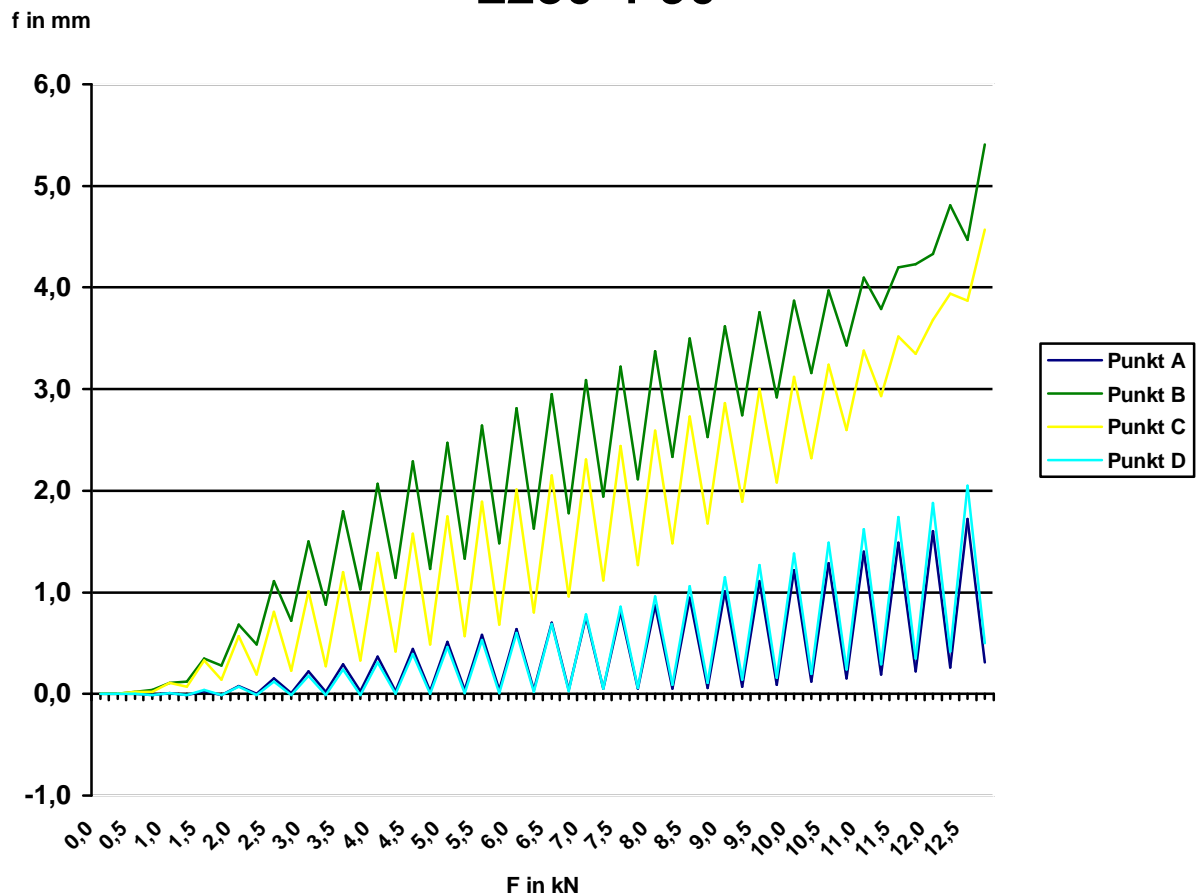
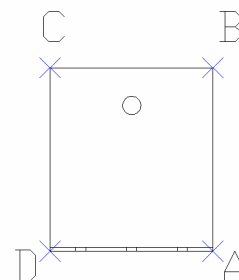
L230-4-90°

Abbildung 76: Diagramm L230-4-90°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C	Punkt D
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,00	0,02	0,02	0,00
0	-0,01	0,04	0,02	-0,01
1	0,01	0,11	0,11	0,01
0	-0,01	0,12	0,07	-0,01
1,5	0,03	0,35	0,33	0,04
0	-0,01	0,28	0,14	-0,01
2	0,08	0,68	0,57	0,07
0	0,00	0,49	0,19	-0,01
2,5	0,15	1,11	0,81	0,12
0	0,01	0,72	0,23	-0,01

Tabelle 30: Anfangswerte Diagramm L230-4-90°



3.2.6 Winkel 240mm hoch, Wandstärke 4,5mm

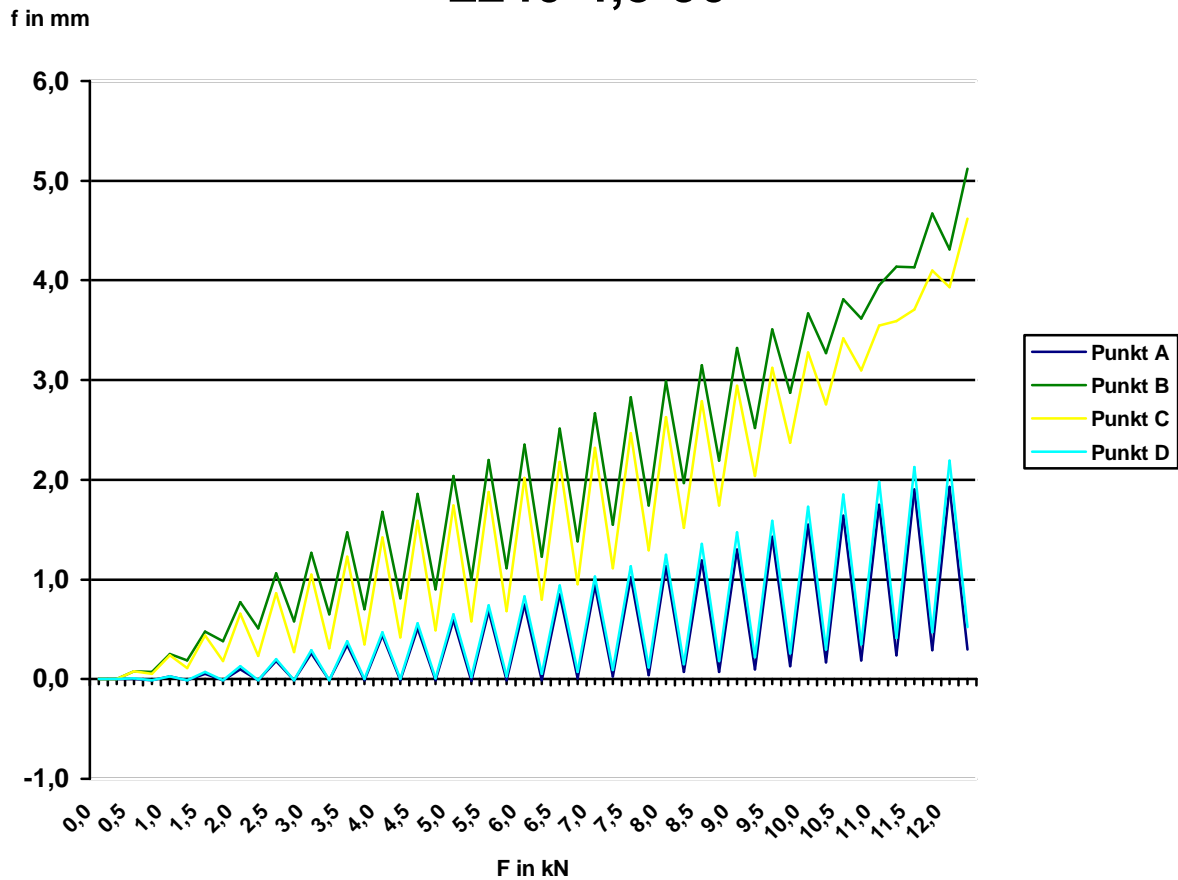
L240-4,5-90°

Abbildung 77: Diagramm L240-4,5-90°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C	Punkt D
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,00	0,08	0,08	0,01
0	-0,01	0,07	0,05	-0,01
1	0,03	0,25	0,24	0,03
0	-0,01	0,19	0,11	-0,01
1,5	0,05	0,48	0,44	0,07
0	-0,01	0,38	0,18	-0,01
2	0,10	0,77	0,66	0,13
0	-0,01	0,51	0,23	-0,01
2,5	0,18	1,06	0,86	0,20
0	-0,01	0,58	0,27	-0,01

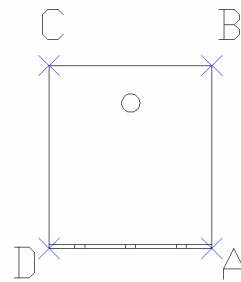


Tabelle 31: Anfangswerte Diagramm L240-4,5-90°

3.2.7 Winkel 280mm hoch, Wandstärke 4,5mm

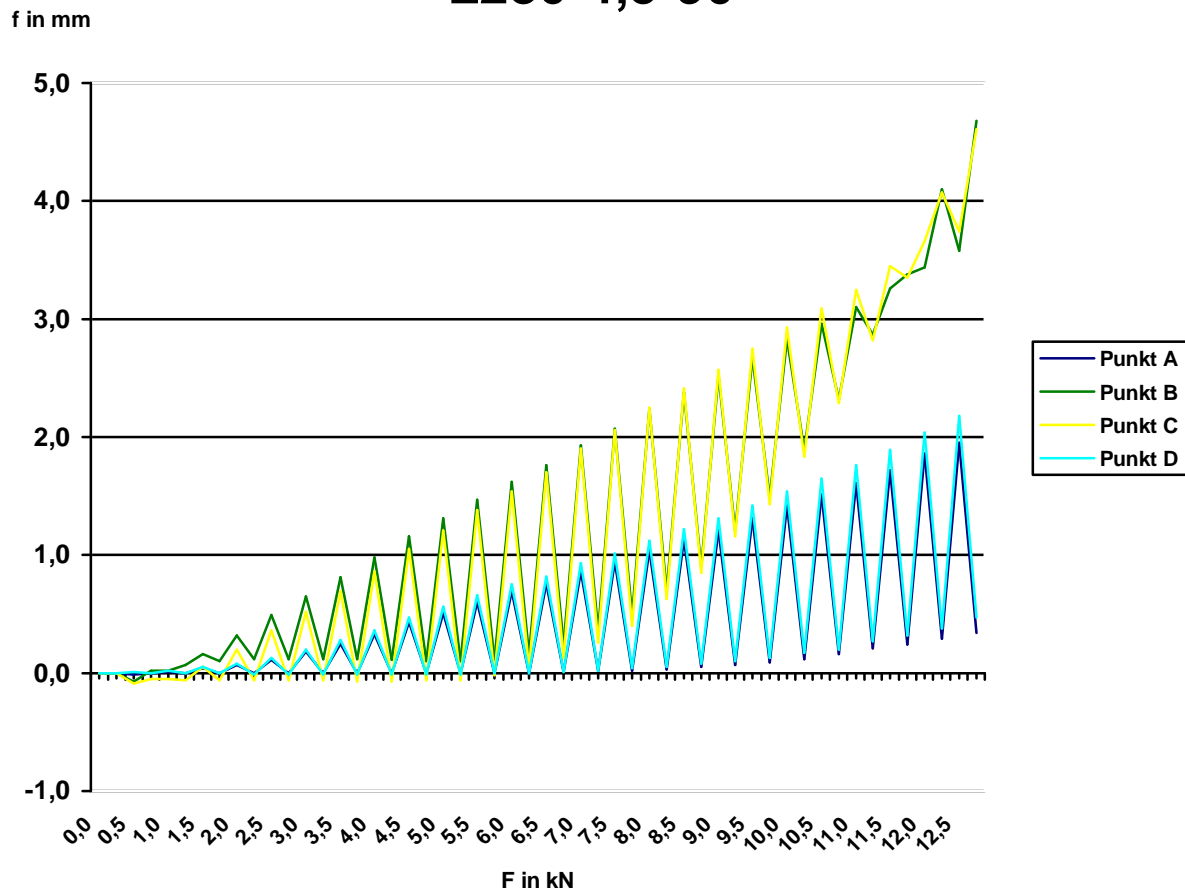
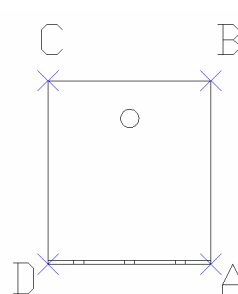
L280-4,5-90°

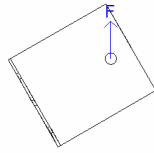
Abbildung 78: Diagramm L280-4,5-90°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C	Punkt D
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	-0,01	-0,07	-0,09	0,01
0	0,00	0,02	-0,05	0,00
1	0,01	0,02	-0,05	0,02
0	0,00	0,07	-0,06	0,00
1,5	0,04	0,16	0,05	0,05
0	0,00	0,10	-0,06	0,00
2	0,07	0,32	0,20	0,08
0	0,00	0,12	-0,06	-0,01
2,5	0,11	0,49	0,36	0,13
0	0,00	0,12	-0,06	-0,01

Tabelle 32: Anfangswerte Diagramm L280-4,5-90°



3.3 Krafteinleitung 60°



3.3.1 Winkel 120mm hoch, Wandstärke 3mm

L120-3-60°

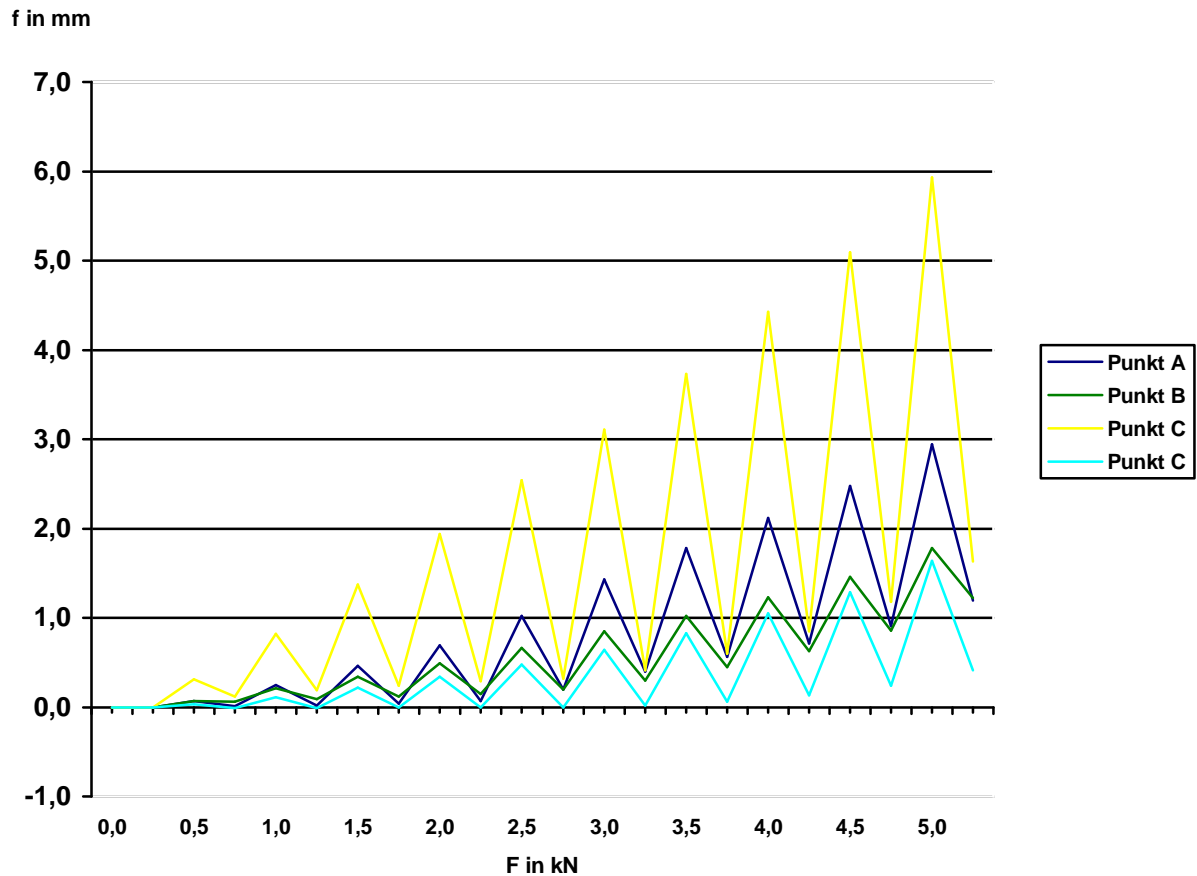
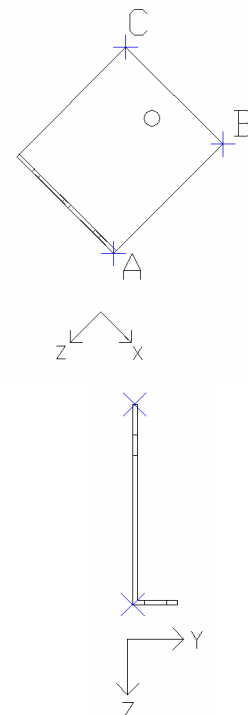


Abbildung 79: Diagramm L120-3-60°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C f in y-Richtung	Punkt C f in x-Richtung
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,07	0,31	0,07	0,03
0	0,01	0,12	0,06	-0,01
1	0,25	0,82	0,21	0,11

Tabelle 33: Anfangswerte Diagramm L120-3-60°



3.3.2 Winkel 160mm hoch, Wandstärke 3mm

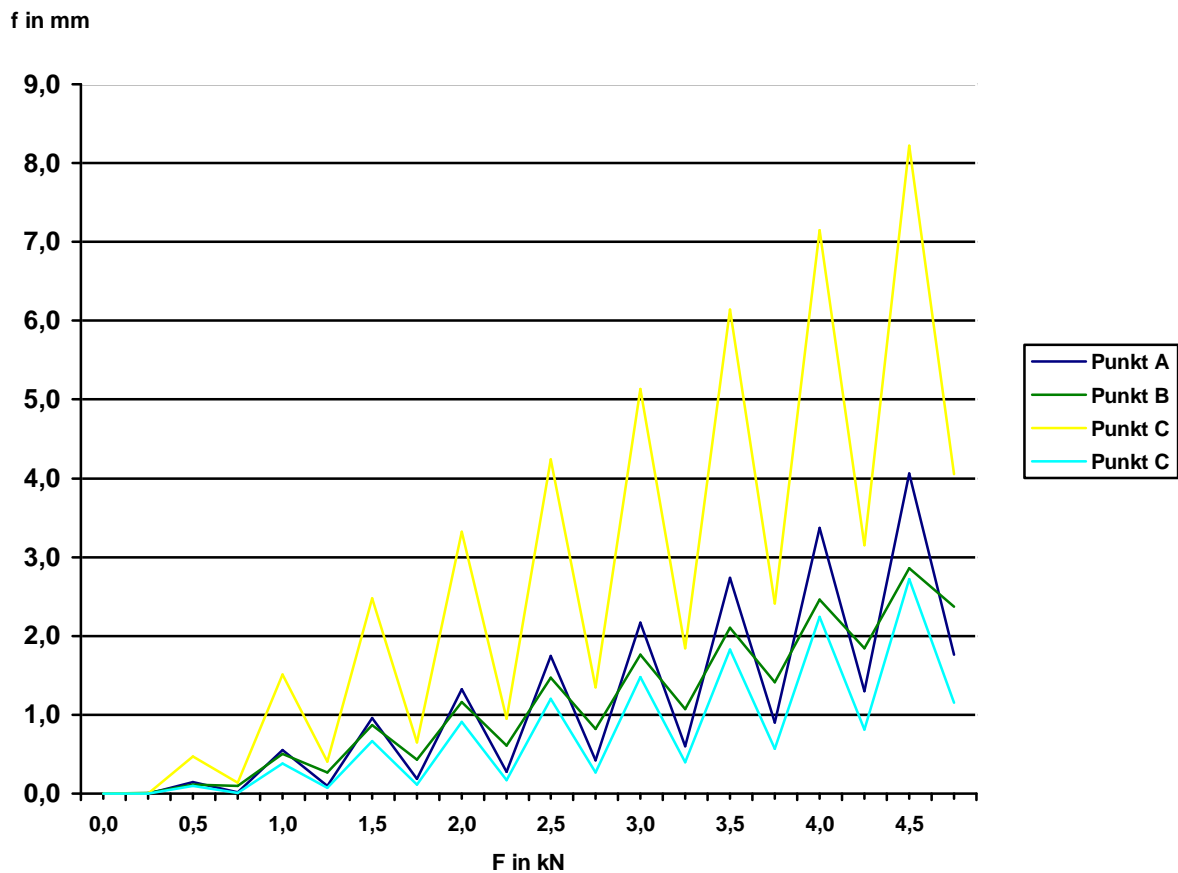
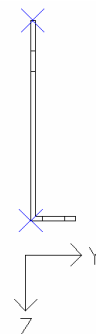
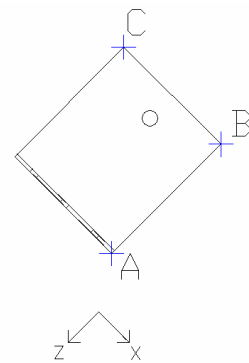
L160-3-60°

Abbildung 80: Diagramm L160-3-60°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C f in y-Richtung	Punkt C f in x-Richtung
0	0,00	0,00	0,01	0,00
0,5	0,15	0,47	0,11	0,10
0	0,02	0,14	0,10	0,01
1	0,55	1,51	0,50	0,38
0	0,10	0,41	0,27	0,07

Tabelle 34: Anfangswerte Diagramm L160-3-60°



3.3.3 Winkel 180mm hoch, Wandstärke 4mm

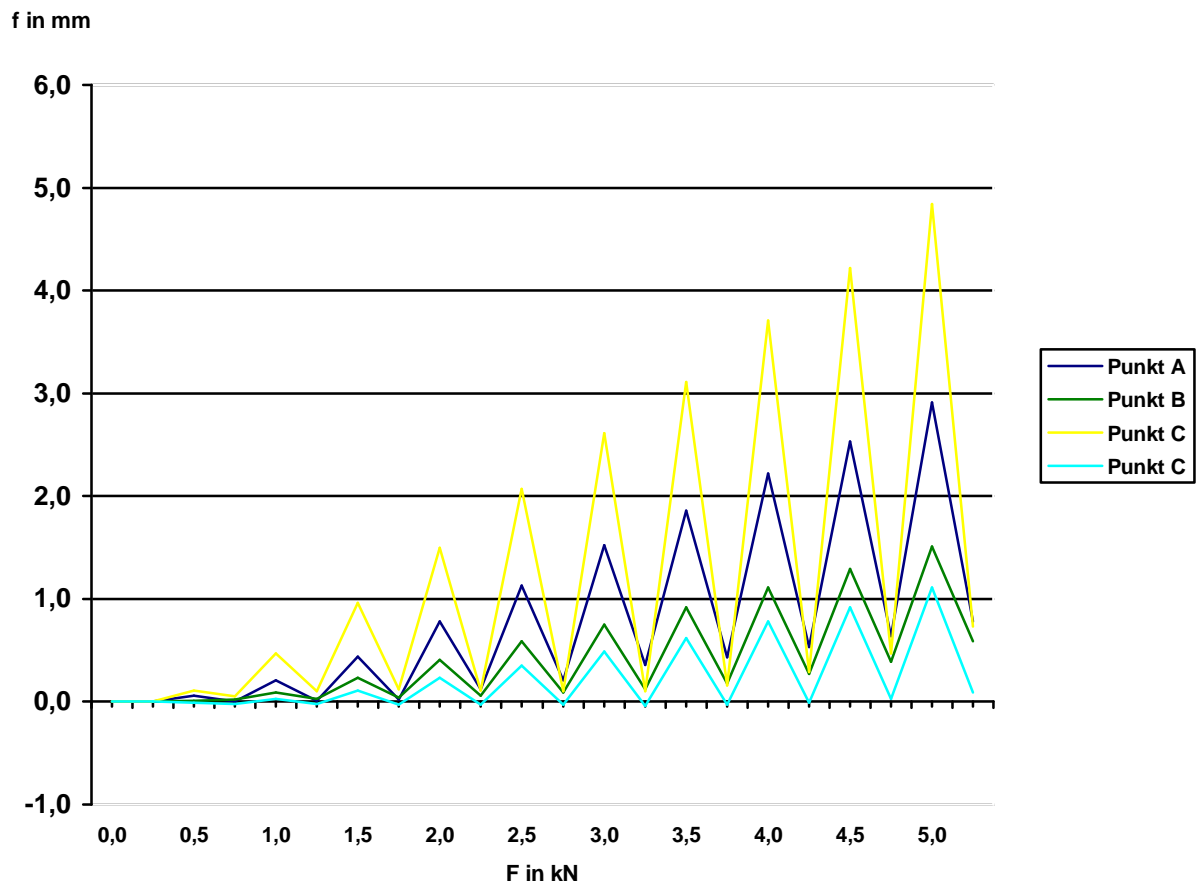
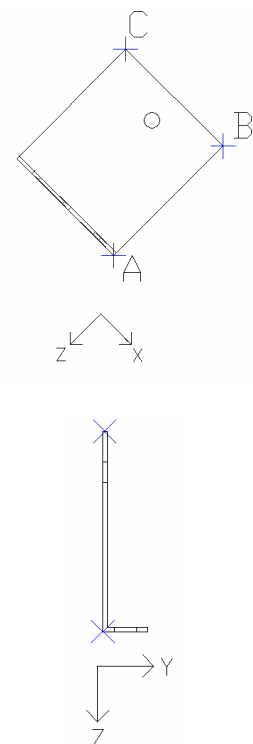
L180-4-60°

Abbildung 81: Diagramm L180-4-60°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C f in y-Richtung	Punkt C f in x-Richtung
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,06	0,11	0,01	-0,01
0	0,00	0,05	0,02	-0,02
1	0,21	0,47	0,09	0,03
0	0,01	0,10	0,03	-0,02

Tabelle 35: Anfangswerte Diagramm L180-4-60°



3.3.4 Winkel 210mm hoch, Wandstärke 4mm

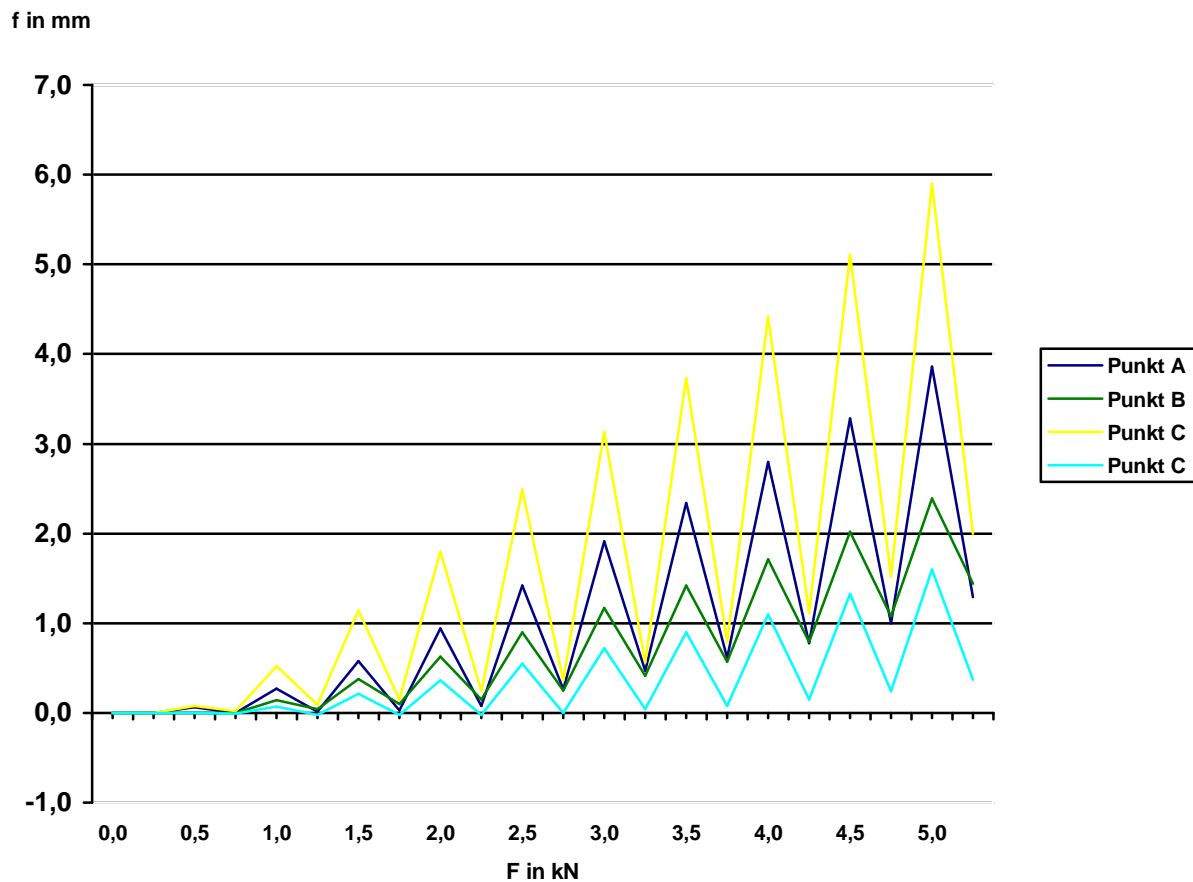
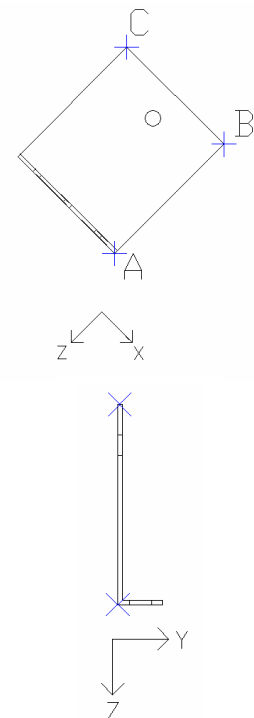
L210-4-60°

Abbildung 82: Diagramm L210-4-60°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C f in y-Richtung	Punkt C f in x-Richtung
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,06	0,08	0,00	0,00
0	0,00	0,02	0,00	-0,01
1	0,27	0,52	0,14	0,07
0	0,01	0,09	0,04	-0,02

Tabelle 36: Anfangswerte Diagramm L210-4-60°



3.3.5 Winkel 230mm hoch, Wandstärke 4mm

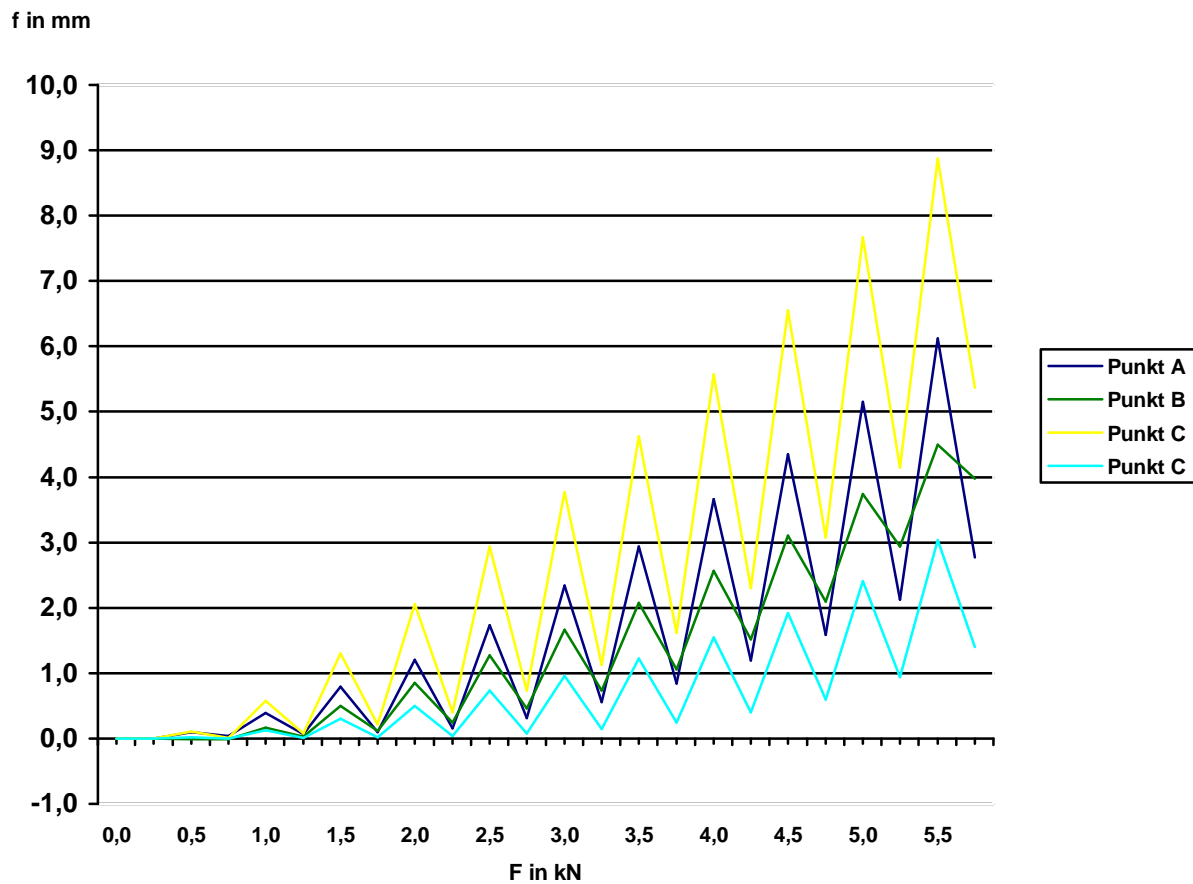
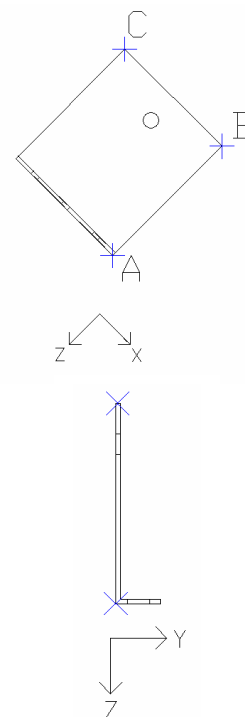
L230-4-60°

Abbildung 83: Diagramm L230-4-60°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C f in y-Richtung	Punkt C f in x-Richtung
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,10	0,11	-0,01	0,02
0	0,04	0,01	-0,01	0,00
1	0,39	0,58	0,17	0,13
0	0,07	0,08	0,03	0,01

Tabelle 37: Anfangswerte Diagramm L230-4-60°



3.3.6 Winkel 240mm hoch, Wandstärke 4,5mm

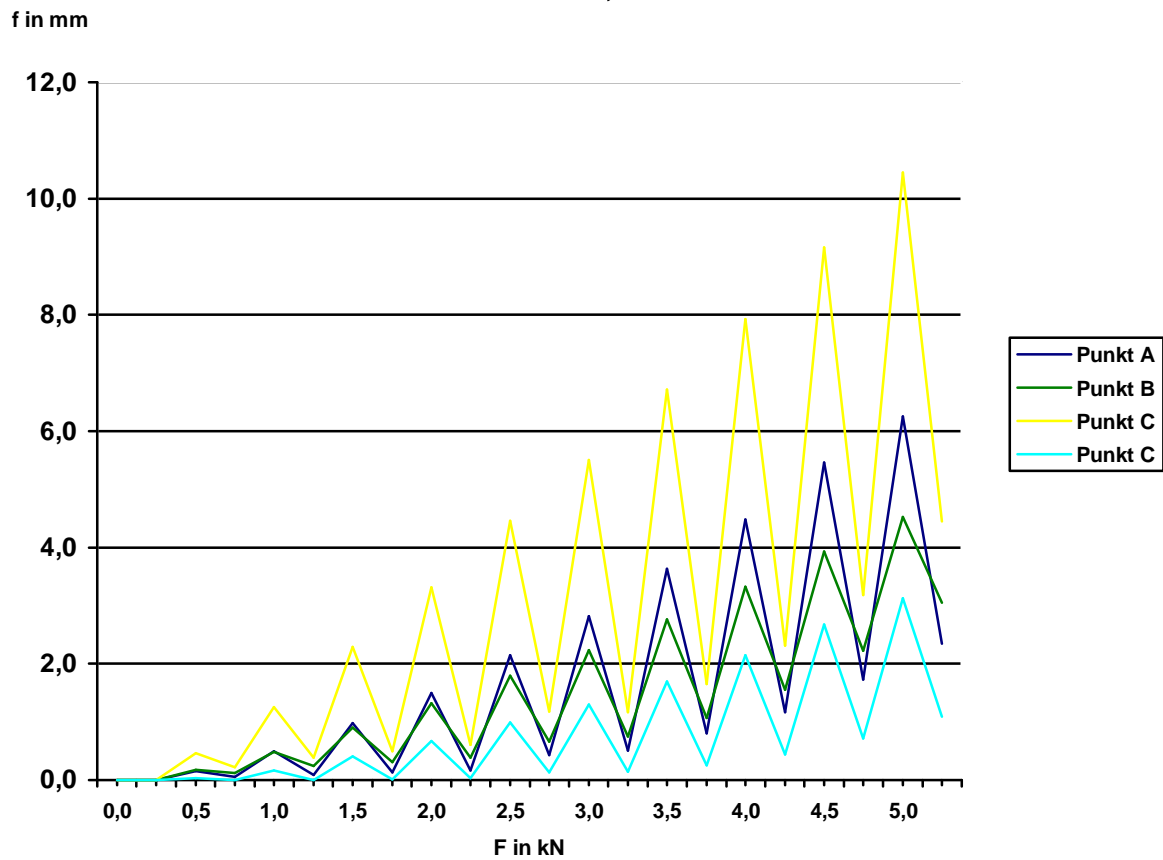
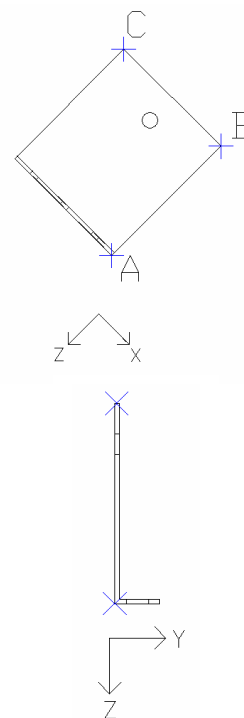
L240-4,5-60°

Abbildung 84: Diagramm L240-4,5-60°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C f in y-Richtung	Punkt C f in x-Richtung
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,15	0,91	0,60	0,14
0	0,06	0,27	0,30	0,02
1	0,48	1,95	1,05	0,34
0	0,09	0,46	0,47	0,04

Tabelle 38: Anfangswerte Diagramm L240-4,5-60°



3.3.7 Winkel 280mm hoch, Wandstärke 4,5mm

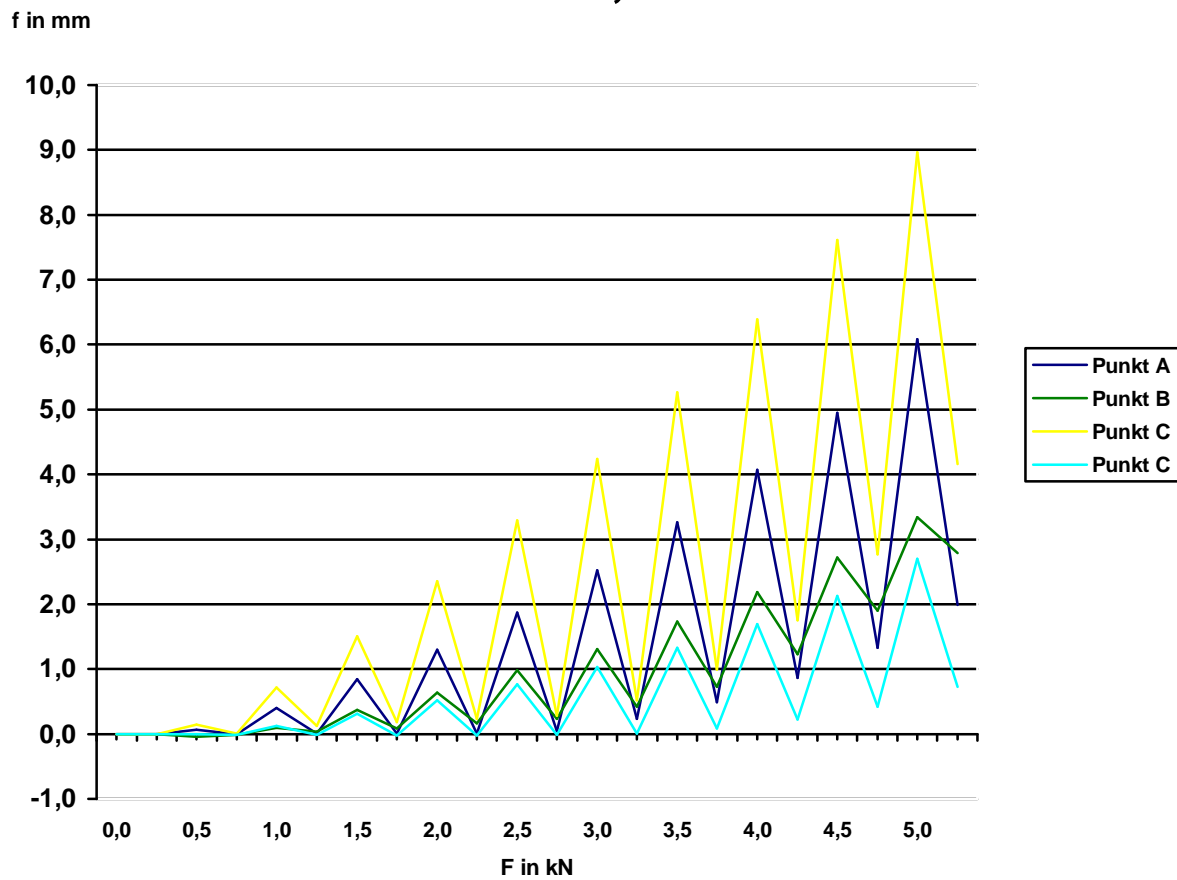
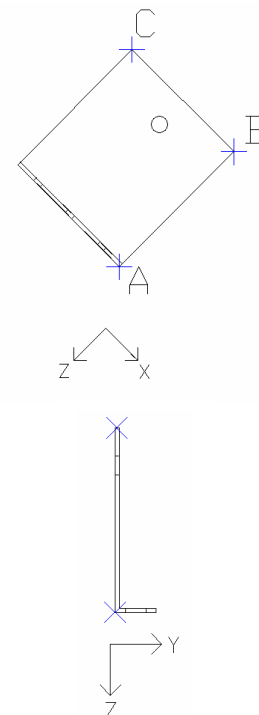
L280-4,5-60°

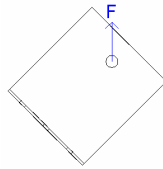
Abbildung 85: Diagramm L280-4,5-60°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C f in y-Richtung	Punkt C f in x-Richtung
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,07	0,14	-0,04	0,00
0	0,00	0,01	-0,01	-0,01
1	0,40	0,72	0,10	0,12
0	0,01	0,12	0,04	-0,01

Tabelle 39: Anfangswerte Diagramm L280-4,5-60°



3.4 Krafteinleitung 45°



3.4.1 Winkel 120mm hoch, Wandstärke 3mm

L120-3-45°

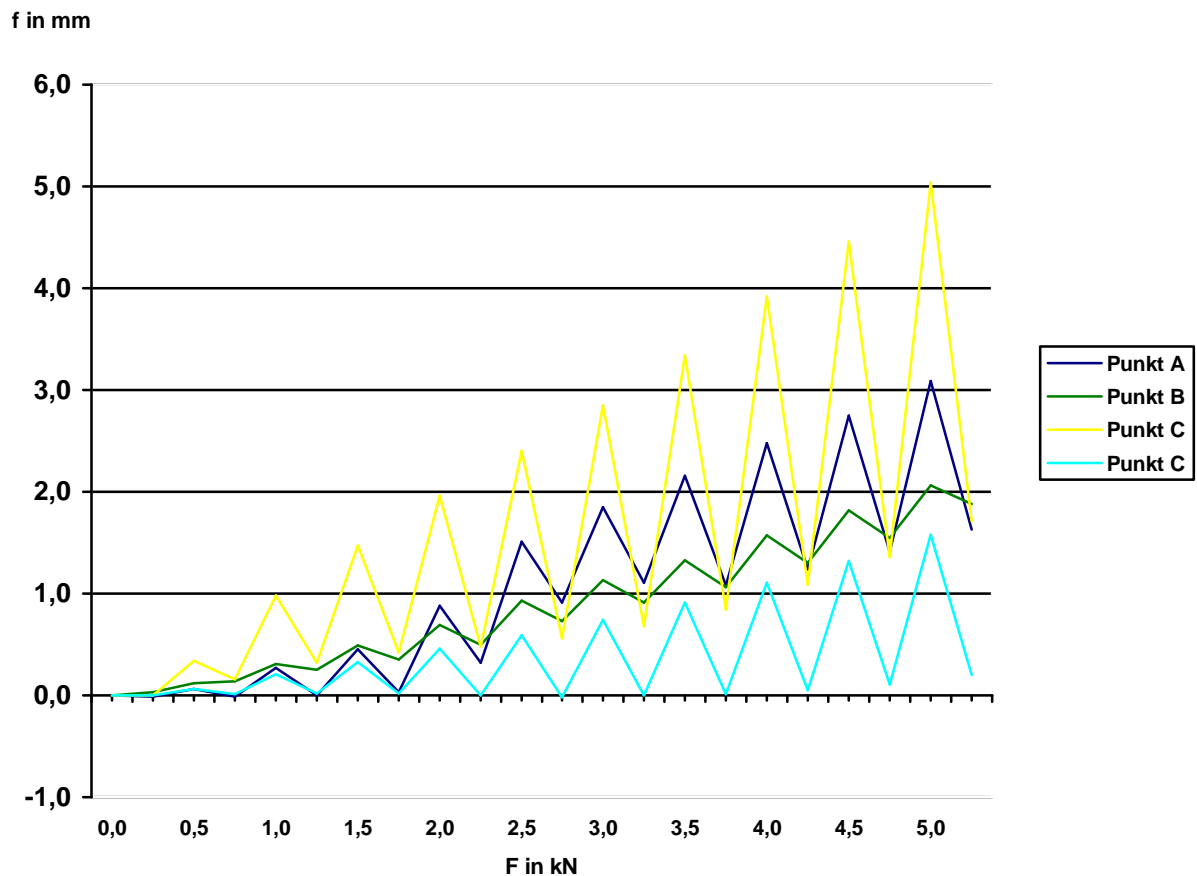
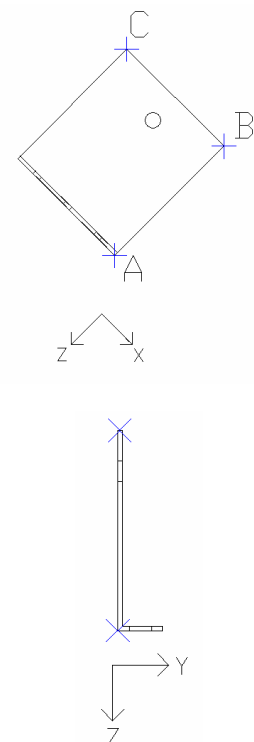


Abbildung 86: Diagramm L120-3-45°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C f in y-Richtung	Punkt C f in x-Richtung
0	-0,01	0,00	0,03	0,00
0,5	0,06	0,34	0,12	0,06
0	-0,01	0,16	0,14	0,01
1	0,27	0,98	0,31	0,21
0	0,00	0,32	0,25	0,02

Tabelle 40: Anfangswerte Diagramm L120-3-45°



3.4.2 Winkel 160mm hoch, Wandstärke 3mm

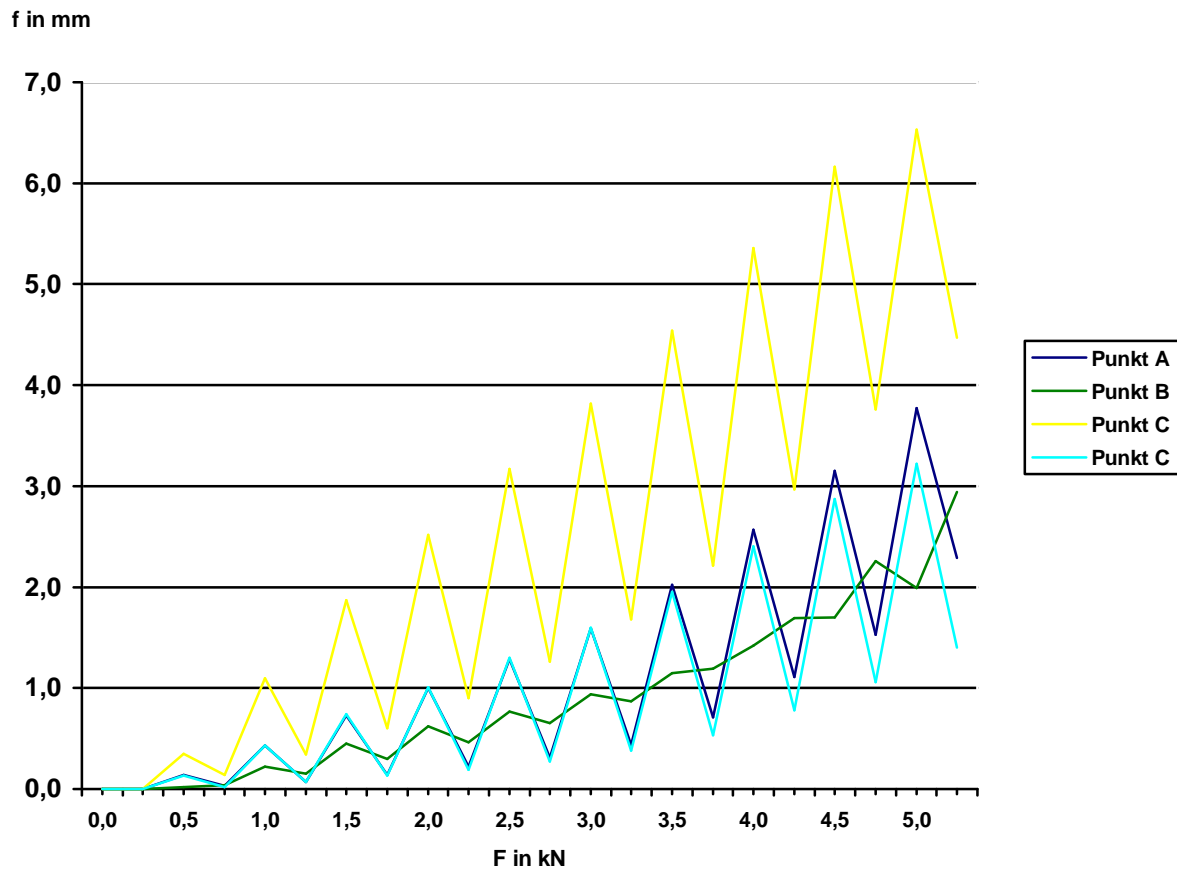
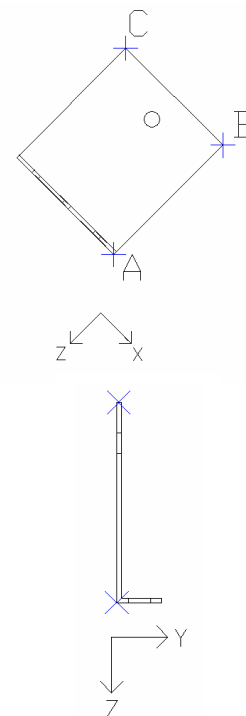
L160-3-45°

Abbildung 87: Diagramm L160-3-45°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C f in y-Richtung	Punkt C f in x-Richtung
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,14	0,35	0,02	0,13
0	0,03	0,14	0,04	0,02
1	0,43	1,10	0,22	0,43
0	0,07	0,34	0,15	0,07

Tabelle 41: Anfangswerte Diagramm L160-3-45°



3.4.3 Winkel 180mm hoch, Wandstärke 4mm

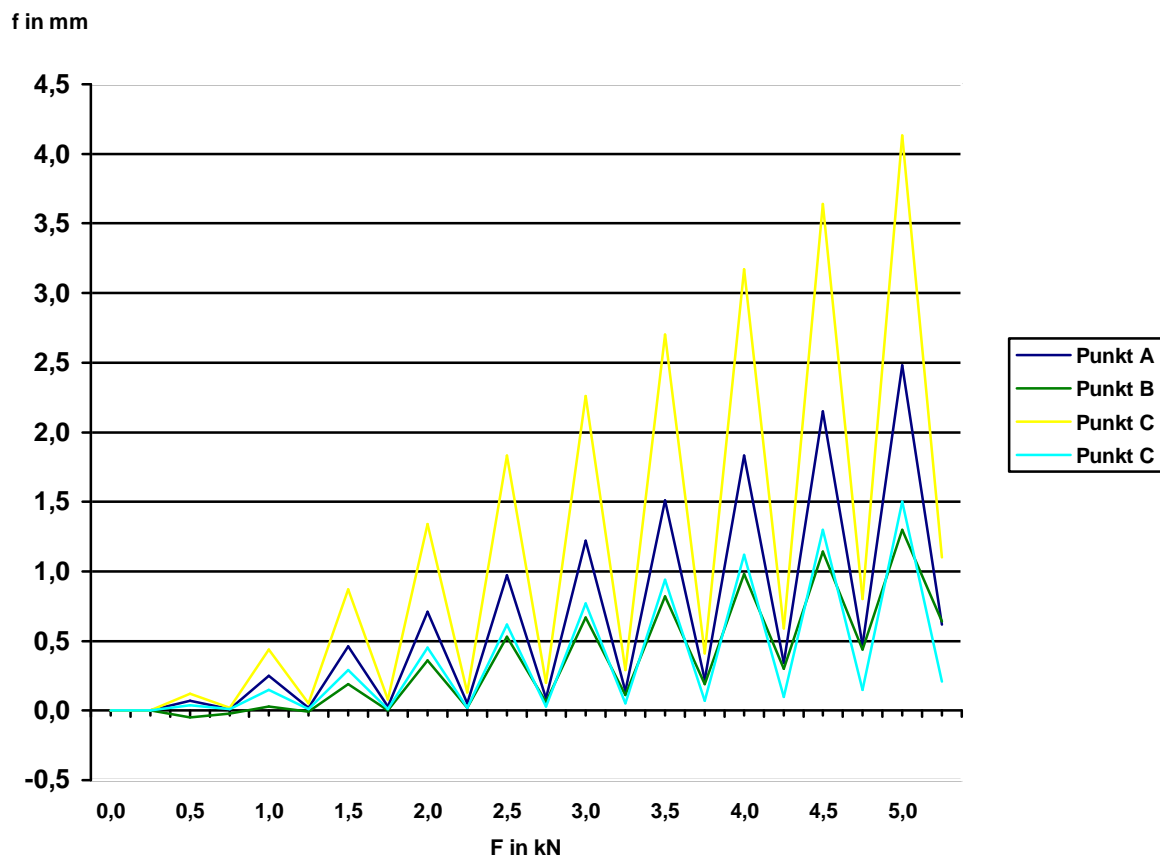
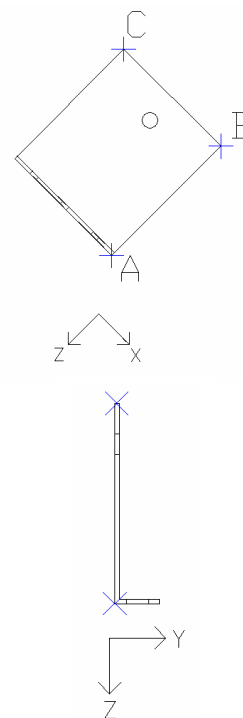
L180-4-45°

Abbildung 88: Diagramm L180-4-45°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C f in y-Richtung	Punkt C f in y-Richtung
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,07	0,12	-0,05	0,04
0	0,01	0,02	-0,02	0,01
1	0,25	0,44	0,03	0,15
0	0,02	0,05	-0,01	0,01

Tabelle 42: Anfangswerte Diagramm L180-4-45°



3.4.4 Winkel 210mm hoch, Wandstärke 4mm

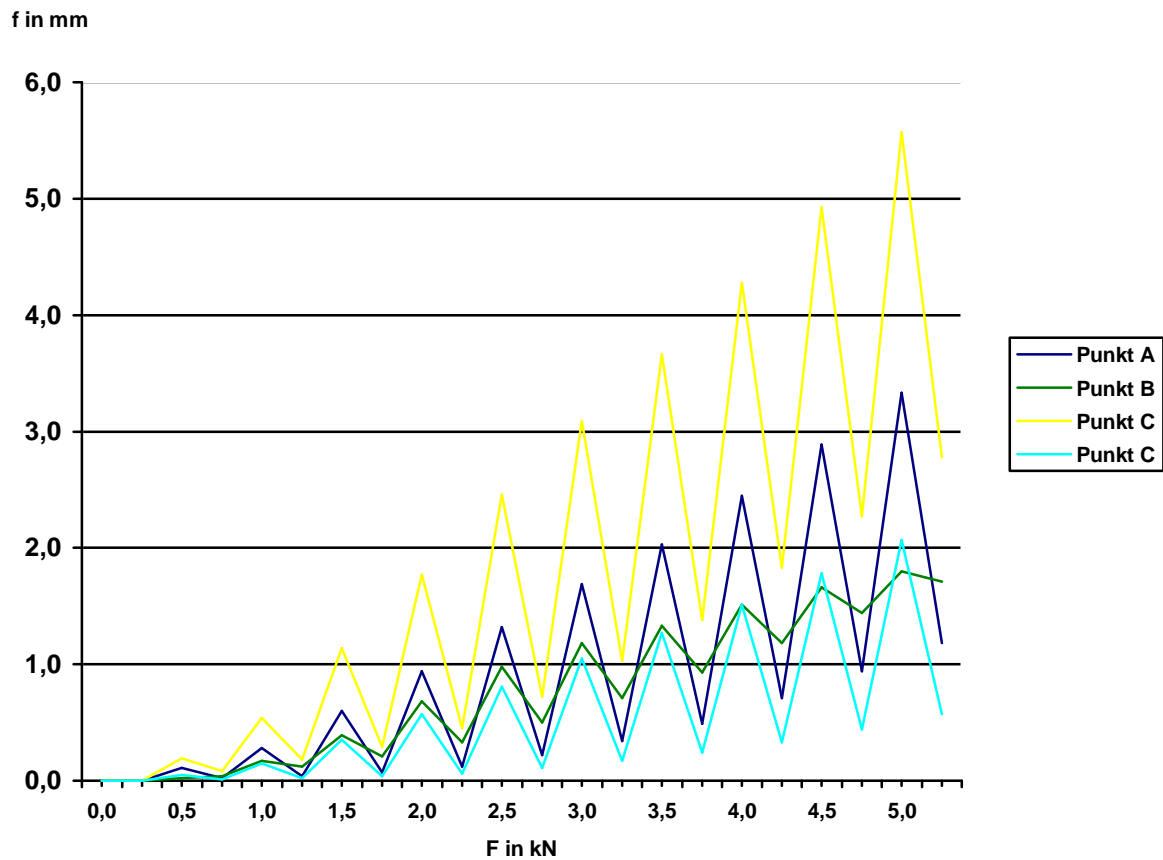
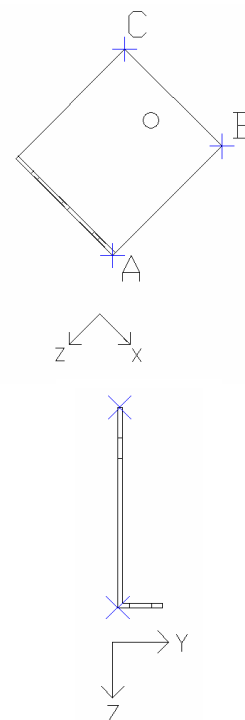
L210-4-45°

Abbildung 89: Diagramm L210-4-45°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C f in y-Richtung	Punkt C f in x-Richtung
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,11	0,19	0,02	0,05
0	0,02	0,08	0,04	0,01
1	0,28	0,54	0,17	0,15
0	0,04	0,18	0,12	0,02

Tabelle 43: Anfangswerte Diagramm L210-4-45°



3.4.5 Winkel 230mm hoch, Wandstärke 4mm

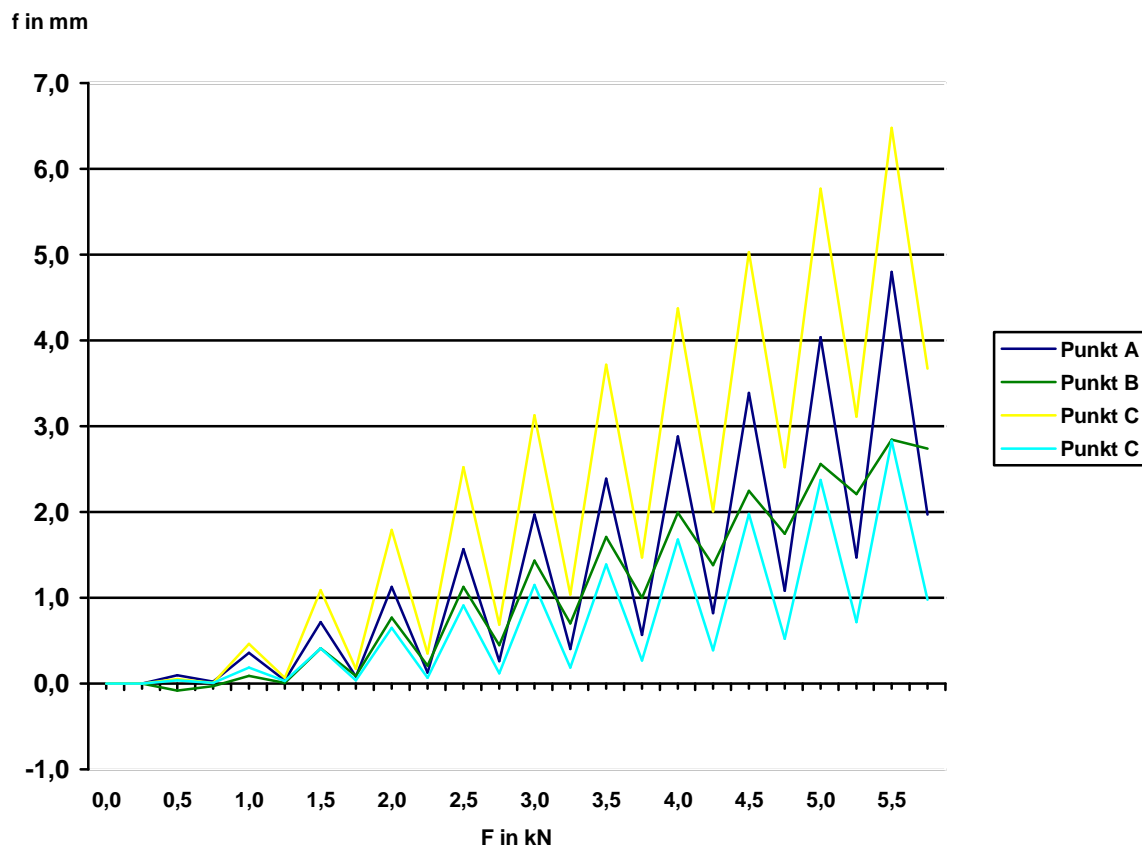
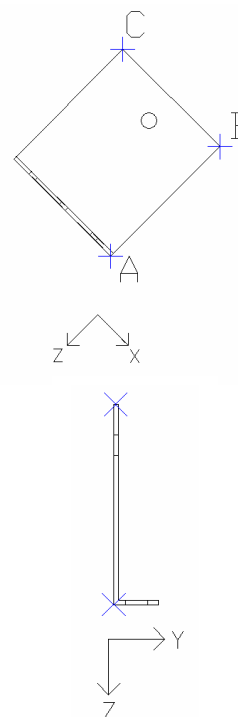
L230-4-45°

Abbildung 90: Diagramm L230-4-45°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C f in y-Richtung	Punkt C f in x-Richtung
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,10	0,05	-0,08	0,04
0	0,02	0,01	-0,03	0,01
1	0,36	0,46	0,09	0,19
0	0,04	0,07	0,01	0,03

Tabelle 44: Anfangswerte Diagramm L230-4-45



3.4.6 Winkel 240mm hoch, Wandstärke 4,5mm

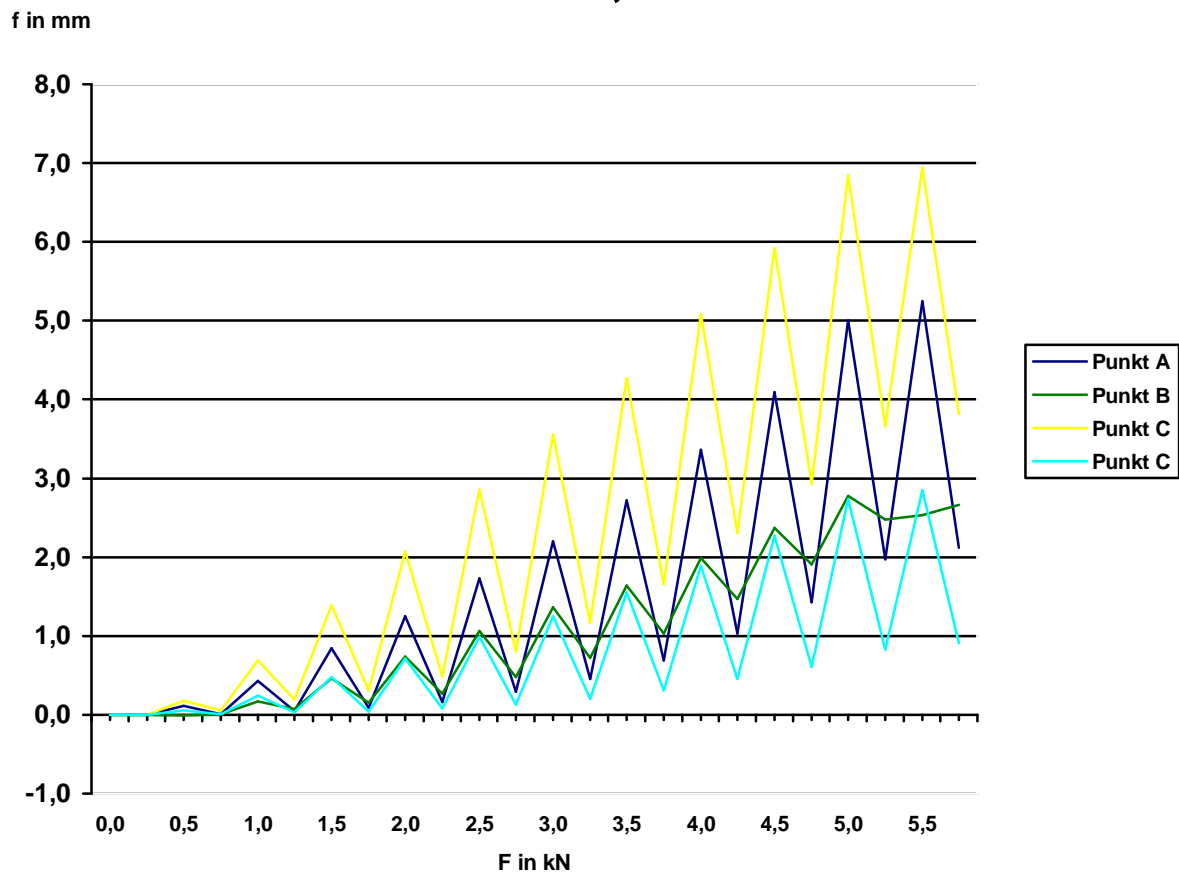
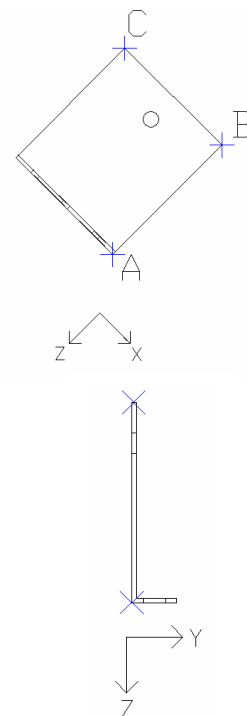
L240-4,5-45°

Abbildung 91: Diagramm L240-4,5-45°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C f in y-Richtung	Punkt C f in x-Richtung
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,11	0,18	-0,01	0,06
0	0,01	0,06	0,01	0,01
1	0,43	0,69	0,17	0,24
0	0,05	0,19	0,07	0,03

Tabelle 45: Anfangswerte Diagramm L240-4,5-45°



3.4.7 Winkel 280mm hoch, Wandstärke 4,5mm

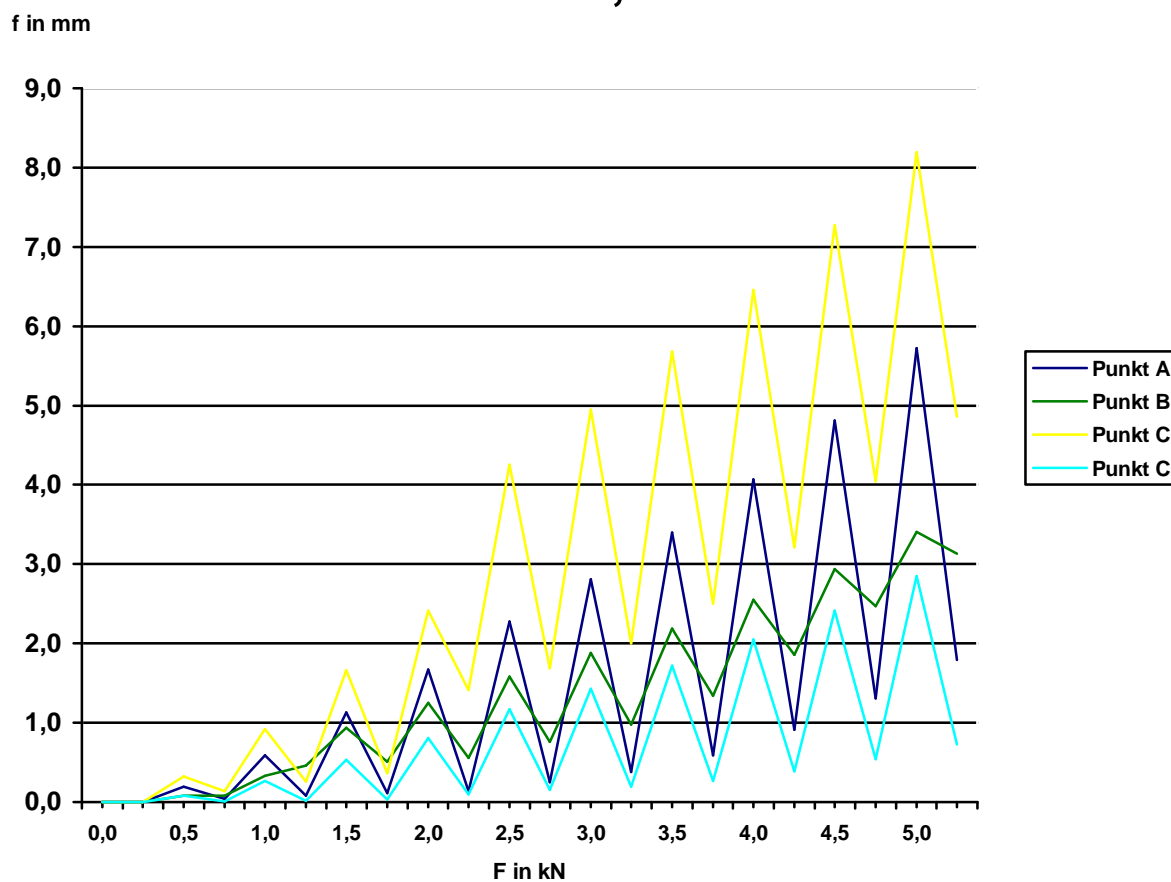
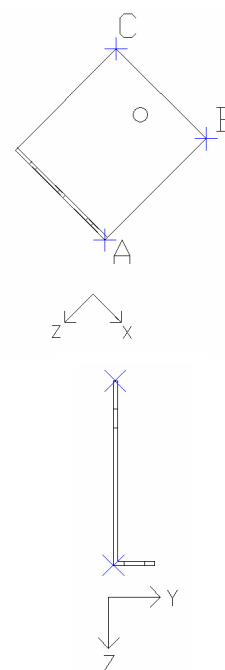
L280-4,5-45°

Abbildung 92: Diagramm L280-4,5-45°

	Punkt A	Punkt B	Punkt C f in y-Richtung	Punkt C f in x-Richtung
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,19	0,32	0,08	0,08
0	0,04	0,14	0,08	0,01
1	0,59	0,92	0,33	0,27
0	0,08	0,26	0,46	0,02

Tabelle 46: Anfangswerte Diagramm L280-4,5-45°



3.5 Auswertung Ergebnisse aus praktischen Versuchen

- Wie in den Diagrammen zu erkennen, kommt es zuerst in dem oberen Schenkel des Winkels zu dauerhaften Verformungen.
- Diese Verformungen treten schon bei sehr geringen Zugkräften auf.
- Bei einigen Versuchsreihen, wie z.B. L180-4-90° verformt sich der obere Schenkel zuerst in die negative y-Richtung.
- Das kann folgende Gründe haben:
 - Eigenspannungen im Material
 - Wegaufnehmer wurden durch die Konstruktion ihrer Halter während der Belastung nicht exakt in der Ausgangsstellung gehalten
 - Geringe Querkkräfte in negative y-Richtung könnten aufgrund der Prüfstandkonstruktion auf den Aluminiumschenkel einwirken
- Diese Fehlerquellen beeinflussen die Messungen allerdings nur gering, sind aber beim Vergleich der Ergebnisse mit denen des Rechenprogramms mit zu beachten.
- In der Praxis ist das Ausweichen der Aluminiumwinkel in y-Richtung durch konstruktive Maßnahmen größtenteils nicht möglich.
- Somit ist die dauerhafte Verformung des unteren Schenkels in z-Richtung von Bedeutung.
- Diese Verformungen waren während der Durchführung der Versuche auch optisch erkennbar.
- Aufgrund dieser Tatsachen können die ermittelten Zuglasten im Verhältnis zur Verformung im Punkt A für statistische Auswertungen verwendet werden.

Um diese ermittelten Werte in der Praxis zur Nachweisführung verwenden zu können, ist eine statistische Auswertung nach DIN EN 18516 (2010-06) Anhang A notwendig.

4 Ergebnisse mit dem Finite-Element-Programm Dlubal RFEM

4.1 Ergebnisse Zuglasten 90°

L 120-3

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	8,95	0,21	0,02
1,0	17,73	0,39	0,04
1,5	26,38	0,55	0,06

Tabelle 47: Ergebnisse RFEM L120-3-90°

L 160-3

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	8,91	0,26	0,02
1,0	17,62	0,46	0,05
1,5	26,19	0,62	0,07

Tabelle 48: Ergebnisse RFEM L160-3-90°

L 180-4

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	4,74	0,12	0,01
1,0	9,43	0,23	0,02
1,5	14,06	0,32	0,03
2,0	18,65	0,41	0,04
2,5	23,21	0,48	0,05

Tabelle 49: Ergebnisse RFEM L180-4-90°

L 210-4

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	4,74	0,14	0,01
1,0	9,41	0,25	0,02
1,5	14,01	0,35	0,03
2,0	18,60	0,44	0,04
2,5	23,14	0,51	0,05

Tabelle 50: Ergebnisse RFEM L210-4-90°

L 230-4

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	4,73	0,15	0,01
1,0	9,40	0,27	0,02
1,5	14,01	0,37	0,03
2,0	18,58	0,45	0,04
2,5	23,11	0,52	0,05

Tabelle 51: Ergebnisse RFEM L230-4-90°

L 240-4,5

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	3,68	0,11	0,01
1,0	7,31	0,20	0,02
1,5	10,92	0,28	0,02
2,0	14,49	0,34	0,03
2,5	18,05	0,40	0,04
3,0	21,59	0,45	0,05

Tabelle 52: Ergebnisse RFEM L240-4,5-90°

L 280-4,5

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	3,67	0,13	0,01
1,0	7,30	0,22	0,02
1,5	10,90	0,30	0,03
2,0	14,47	0,36	0,03
2,5	18,02	0,41	0,04
3,0	21,56	0,46	0,05

Tabelle 53: Ergebnisse RFEM L280-4,5-90°

4.2 Ergebnisse Zuglasten 60°

L 120-3

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	14,66	0,26	0,05
1,0	29,23	0,53	0,10

Tabelle 54: Ergebnisse RFEM L120-3-60°

L 160-3

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	19,59	0,40	0,07
1,0	39,04	0,79	0,13

Tabelle 55: Ergebnisse RFEM L160-3-60°

L 180-4

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	11,86	0,19	0,04
1,0	23,68	0,38	0,07

Tabelle 56: Ergebnisse RFEM L180-4-60°

L 210-4

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	13,88	0,24	0,04
1,0	27,71	0,48	0,09

Tabelle 57: Ergebnisse RFEM L210-4-60°

L 230-4

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	15,23	0,28	0,05
1,0	30,41	0,56	0,10

Tabelle 58: Ergebnisse RFEM L230-4-60°

L 240-4,5

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	12,48	0,22	0,04
1,0	24,92	0,45	0,08

Tabelle 59: Ergebnisse RFEM L240-4,5-60°

L 280-4,5

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	14,61	0,29	0,05
1,0	29,16	0,60	0,10

Tabelle 60: Ergebnisse RFEM L280-4,5-60°

4.3 Ergebnisse Zuglasten 45°

L 120-3

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	14,73	0,26	0,05
1,0	29,31	0,53	0,10

Tabelle 61: Ergebnisse RFEM L120-3-45°

L 160-3

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	18,71	0,39	0,06
1,0	37,81	0,75	0,13

Tabelle 62: Ergebnisse RFEM L160-3-45°

L 180-4

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	11,10	0,18	0,03
1,0	22,12	0,36	0,06

Tabelle 63: Ergebnisse RFEM L180-4-45°

L 210-4

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	12,74	0,23	0,04
1,0	25,38	0,45	0,08

Tabelle 64: Ergebnisse RFEM L210-4-45°

L 230-4

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	13,82	0,26	0,04
1,0	27,56	0,51	0,08

Tabelle 65: Ergebnisse RFEM L230-4-45°

L 240-4,5

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	11,26	0,21	0,04
1,0	22,46	0,41	0,07

Tabelle 66: Ergebnisse RFEM L240-4,5-45°

L 280-4,5

Zuglast in kN	max. Spannung in kN/cm ²	max. Verformung auf y-Achse in mm	Max. Verformung auf z-Achse in mm
0,5	12,99	0,26	0,04
1,0	25,90	0,52	0,08

Tabelle 67: Ergebnisse RFEM L240-4,5-45°

4.4 Auswertung Ergebnisse aus RFEM

Die Aluminiumwinkel können mit dem Programm RFEM4 nur bis zum Erreichen der Streckgrenze von 20 kN/cm^2 untersucht werden.

Weitere Untersuchungen, wie z.B. das totale Versagen der Winkel oder das Verhalten des Winkels oberhalb der Streckgrenze ist mit dem Programm RFEM4 nicht möglich.

In der folgenden Übersicht sind die maximalen Zugkräfte dargestellt, ohne dass die Streckgrenze überschritten wurde. Diese Ergebnisse können für statische Berechnungen als Näherungswerte angesetzt werden. Allerdings sollte das Ausweichen in y-Richtung durch konstruktive Maßnahmen ausgeschlossen werden.

Übersicht der maximalen Zugkraft ohne Überschreiten der Streckgrenze

	L120-3	L160-3	L180-4	L210-4	L230-4-	L240-4,5	L280-4,5
90°	1 kN	1 kN	2 kN	2 kN	2 kN	2,5 kN	2,5 kN
60°	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN
45°	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN

Tabelle 68: Zugkräfte aus Berechnungen mit RFEM4

5. Vergleichende Betrachtungen

- Verformungsbilder der Aluminiumwinkel ähneln sich sehr

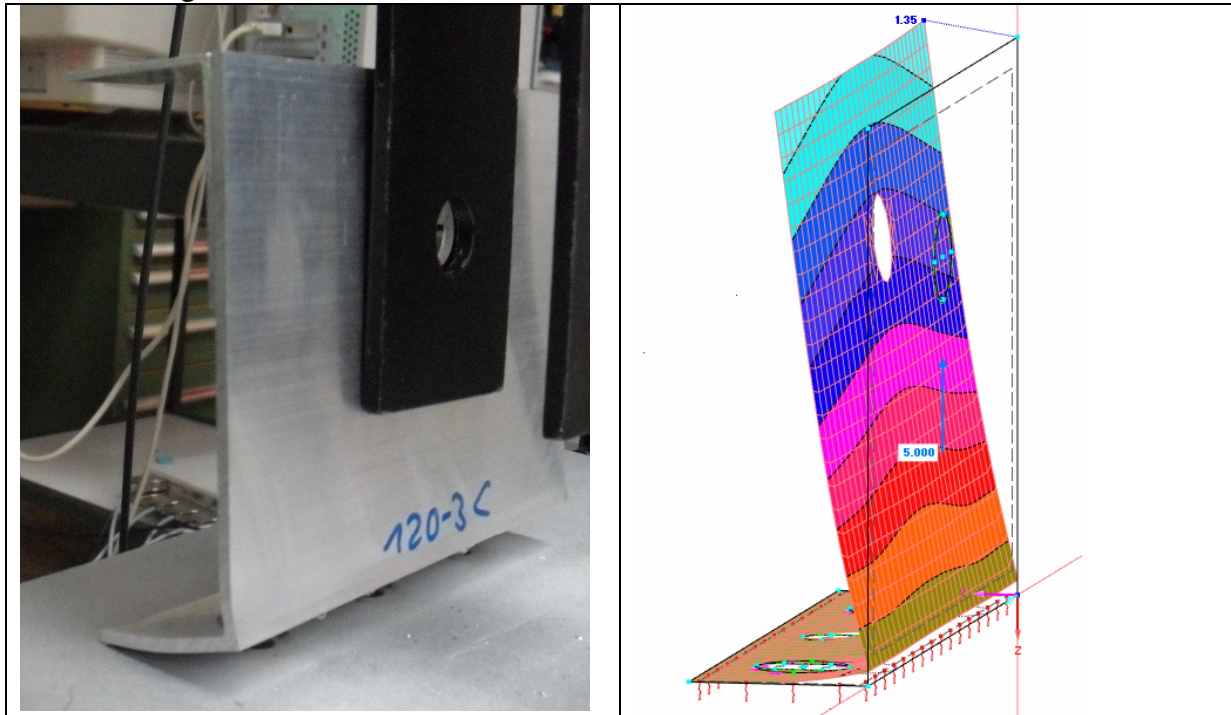


Abbildung 93: Verformungsbilder

Der Vergleich zwischen den praktischen Versuchen und den Ergebnissen mit dem Programm RFEM ist maximal über die Verformungen durchführbar.

Vergleichbare Werte im RFEM Programm sind Verformungswerte, die vor dem Erreichen der Streckgrenze von 20 kN/cm^2 angezeigt werden. Die Verformungswerte der Winkel sind nicht mehr realistisch, sobald beim Aluminium an den kritischen Stellen die Spannungen oberhalb der Streckgrenze liegen.

Bei der Berechnung konnte das plastisch -verfestigende Verhalten von Aluminium nicht berücksichtigt werden.

L 120-3	F _Z in kN	Verformungswerte RFEM in mm		Verformungswerte Versuche in mm		Abweichung in %	
		Punkt A/D	Punkt C/B	Punkt A/D	Punkt C/B	Punkt A/D	Punkt C/B
90°	0,5	0,02	0,21	0,035	0,25	43	20
	1	0,04	0,39	0,12	0,63	67	38
60°	0,5	0,05	0,26	0,07	0,31	29	16
45°	0,5	0,05	0,26	0,06	0,34	17	24

Tabelle 69: Verformungsvergleich L120-3

L 160-3	F _Z in kN	Verformungswerte RFEM in mm		Verformungswerte Versuche in mm		Abweichung in %	
		Punkt A/D	Punkt C/B	Punkt A/D	Punkt C/B	Punkt A/D	Punkt C/B
90°	0,5	0,02	0,26	0,04	-0,02	50	(-)
	1	0,05	0,46	0,14	0,11	64	(76)
60°	0,5	0,07	0,40	0,15	0,47	53	15
45°	0,5	0,06	0,39	0,14	0,35	57	(10)

Tabelle 70: Verformungsvergleich L160-3

L 180-4	F_Z in kN	Verformungswerte RFEM in mm		Verformungswerte Versuche in mm		Abweichung in %	
		Punkt A/D	Punkt C/B	Punkt A/D	Punkt C/B	Punkt A/D	Punkt C/B
90°	0,5	0,01	0,12	0,03	-0,15	66	(-)
	1	0,02	0,23	0,07	-0,20	71	(-)
	1,5	0,03	0,32	0,11	-0,15	72	(-)
	2	0,04	0,41	0,15	-0,07	73	(-)
60°	0,5	0,04	0,19	0,06	0,11	33	(42)
45°	0,5	0,03	0,18	0,07	0,12	57	(33)

Tabelle 71: Verformungsvergleich L180-4

L 210-4	F_Z in kN	Verformungswerte RFEM in mm		Verformungswerte Versuche in mm		Abweichung in %	
		Punkt A/D	Punkt C/B	Punkt A/D	Punkt C/B	Punkt A/D	Punkt C/B
90°	0,5	0,01	0,14	0,02	0,30	50	53
	1	0,02	0,25	0,04	0,57	50	56
	1,5	0,03	0,35	0,07	0,90	57	61
	2	0,04	0,44	0,12	1,20	67	63
60°	0,5	0,04	0,24	0,06	0,08	33	(67)
45°	0,5	0,04	0,23	0,11	0,19	63	(17)

Tabelle 72: Verformungsvergleich L210-4

L 230-4	F_Z in kN	Verformungswerte RFEM in mm		Verformungswerte Versuche in mm		Abweichung in %	
		Punkt A/D	Punkt C/B	Punkt A/D	Punkt C/B	Punkt A/D	Punkt C/B
90°	0,5	0,01	0,15	0,00	0,02	(100)	(87)
	1	0,02	0,27	0,01	0,11	(100)	59
	1,5	0,03	0,37	0,03	0,34	0	(8)
	2	0,04	0,45	0,07	0,63	43	29
60°	0,5	0,05	0,28	0,10	0,11	50	(61)
45°	0,5	0,04	0,26	0,10	0,05	60	(81)

Tabelle 73: Verformungsvergleich L230-4

L 240-4,5	F_Z in kN	Verformungswerte RFEM in mm		Verformungswerte Versuche in mm		Abweichung in %	
		Punkt A/D	Punkt C/B	Punkt A/D	Punkt C/B	Punkt A/D	Punkt C/B
90°	0,5	0,01	0,11	0,01	0,08	0	88
	1	0,02	0,20	0,03	0,24	33	17
	1,5	0,02	0,28	0,06	0,46	67	39
	2	0,03	0,34	0,11	0,71	73	52
	2,5	0,04	0,40	0,19	0,96	79	58
60°	0,5	0,04	0,22	0,15	0,91	73	76
45°	0,5	0,04	0,21	0,11	0,18	64	(14)

Tabelle 74: Verformungsvergleich L240-4,5

L 280-4,5	F_z in kN	Verformungswerte RFEM in mm		Verformungswerte Versuche in mm		Abweichung in %	
		Punkt A/D	Punkt C/B	Punkt A/D	Punkt C/B	Punkt A/D	Punkt C/B
90°	0,5	0,01	0,13	0,00	-0,06	(100)	(-)
	1	0,02	0,22	0,02	-0,01	0	(-)
	1,5	0,03	0,30	0,04	0,11	25	(63)
	2	0,03	0,36	0,12	0,41	75	12
	2,5	0,04	0,41	0,19	0,58	79	29
60°	0,5	0,05	0,29	0,07	0,14	29	(52)
45°	0,5	0,04	0,26	0,19	0,32	79	19

Tabelle 75: Verformungsvergleich L280-4,5

- Die Ergebnisse zeigen, dass die Verformungswerte in den Versuchen in den meisten Fällen größer ist wie die Verformungswerte der RFEM Ergebnisse.
- Die Unterschiede in den Verformungen weichen von 0% bis 88% ab.
- Es gibt auch Verformungswerte, die in den RFEM Ergebnissen größer sind wie die in den praktischen Versuchen.
- Diese Abweichungswerte sind die eingeklammerten Werte.
- In den praktischen Versuchen, in denen die Verformung der Punkte B oder C in die negative y-Richtung erfolgte, konnten die Abweichungen nicht verglichen werden (-).

6. Zusammenfassung

Durch die Untersuchungen der Aluminiumwinkel praktisch an einem Prüfstand und der Untersuchung mit Hilfe eines Rechenprogramms könnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Grundsätzlich ist es möglich, mit beiden Methoden Aussagen über das Verformungsverhalten von Aluminiumwinkeln zu treffen.
- Diese können unter Umständen auch für statische Berechnungen bzw. Nachweise verwendet werden.
- Allerdings ist es dazu notwendig, genaue Abgrenzungen zu treffen.
- Bei den praktischen Versuchen können genauere Aussagen über die Verformungen getroffen werden.
- Der Aufwand dieser praktischen Untersuchungen ist aber sehr aufwendig.

Theoretische Ergebnisse mit dem Rechenprogramm RFEM4:

Übersicht der maximalen Zugkraft ohne Überschreiten der Streckgrenze

	120-3	160-3	180-4	210-4	2304-	240-4,5	280-4,5
90°	1 kN	1 kN	2 kN	2 kN	2 kN	2,5 kN	2,5 kN
60°	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN
45°	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN	0,5 kN

Tabelle 76: Zugkräfte aus Berechnungen mit RFEM4

Diese Zuglasten können für statische Berechnungen als Näherungswerte verwendet werden, egal ob diese Zuglasten als ständige oder dynamische Lasten einwirken, da die Streckgrenze nicht überschritten wurde. Allerdings wurden diese Werte nur theoretisch ermittelt.

Ergebnisse aus praktischen Versuchen:

Um die Versuchsergebnisse in der Praxis in statischen Berechnungen ansetzen zu dürfen, ist ein bauaufsichtliches Prüfzeugnis erforderlich

Vorraussetzungen für ein bauaufsichtliches Prüfzeugnis:

- statistische Auswertung der Versuchsergebnisse nach DIN EN 18516-1(2010-06) Anhang A
- es sind mindestens 10 Versuche pro Winkel und Lastangriff durchzuführen
- Allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnisse dürfen nur von anerkannten Prüfstellen erteilt werden.

In der Bachelorarbeit wurden je 5 Versuche pro Winkel und Lastangriff durchgeführt. Eine statistische Auswertung ist trotzdem möglich.

Am Beispiel 120-3-45° wird diese Auswertung kurz erläutert:

Beispielrechnung: Wandbock 120-3-45° nach der Belastung mit 1,5kN

5 Messergebnisse:

$X_1 = -0,02\text{mm}$
$X_2 = 0,09\text{mm}$
$X_3 = 0,05\text{mm}$
$X_4 = 0,02\text{mm}$
$X_5 = 0,01\text{mm}$

Mittelwert: $\bar{X} = \frac{1}{n} * \sum x_i$ $\bar{X} = 0,03$

Standartabweichung: $s = \pm \sqrt{\frac{\sum (x_i * \bar{x})^2}{n-1}}$ $s = \pm 0,044$

Fraktilwert bei 5 Versuchen: $k_\varepsilon = 2,463$ [Owen, Handbook of statistical fables]

5% Fraktilwert: $x_\varepsilon = \bar{x} - k_\varepsilon * s$

Obergrenze: $x_{\varepsilon 1} = 0,14\text{mm}$

Untergrenze: $x_{\varepsilon 2} = -0,08\text{mm}$

Werden diese Formeln auf alle Messwerte übertragen erhält man folgendes Diagramm

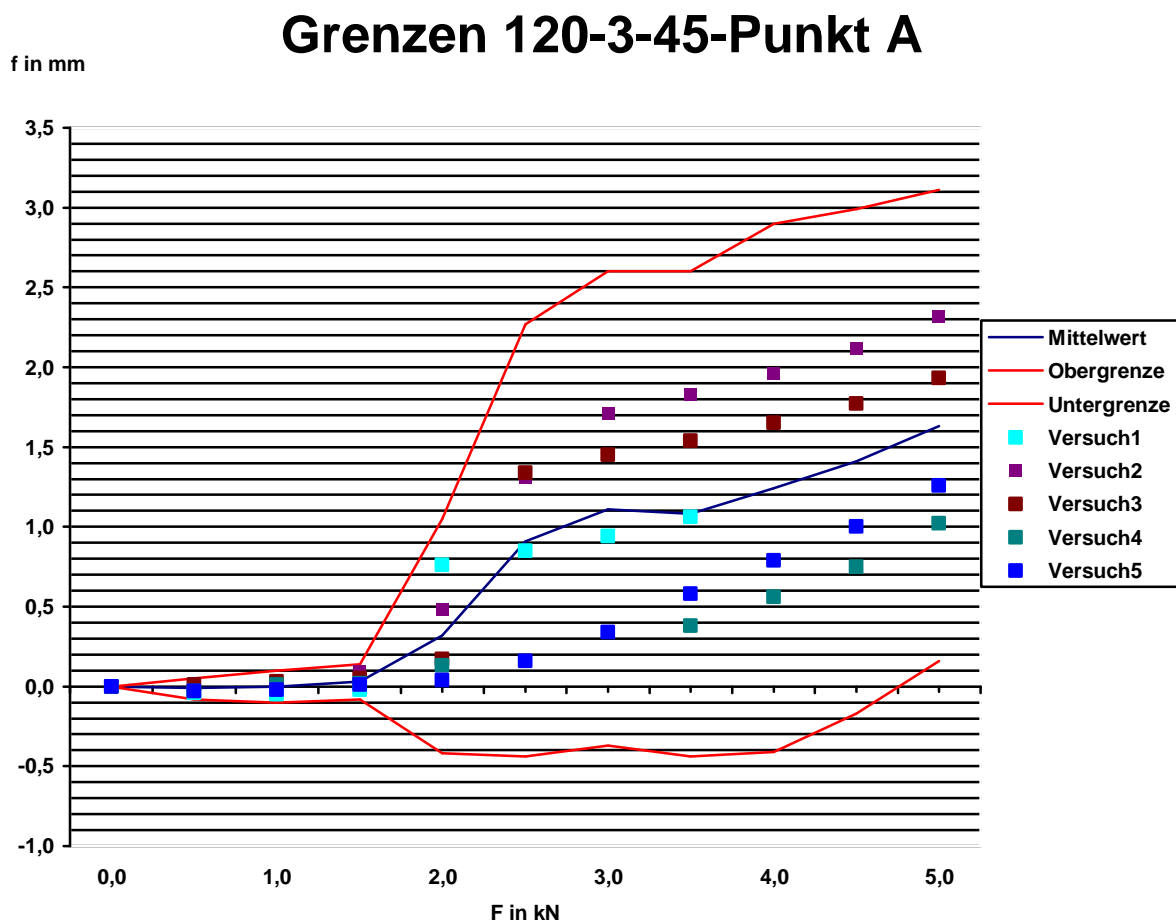


Abbildung 94: Diagramm zur Ermittlung der 5%-Fraktilgrenzen

Die Obergrenze und Untergrenze ist bezogen auf den 5% Fraktilwert. Das heißt, bei einer unendlichen Anzahl von Versuchen der Wandböcke überschreiten bzw. unterschreiten maximal 5% der Werte die Grenzlinien.

Für die weitere Darstellung ist nur die obere Grenzlinie maßgebend!

Alle 5%-Obergrenzen werden in ein Diagramm eingefügt. Somit können Aussagen über die Verformungen der einzelnen Wandböcke getroffen werden.

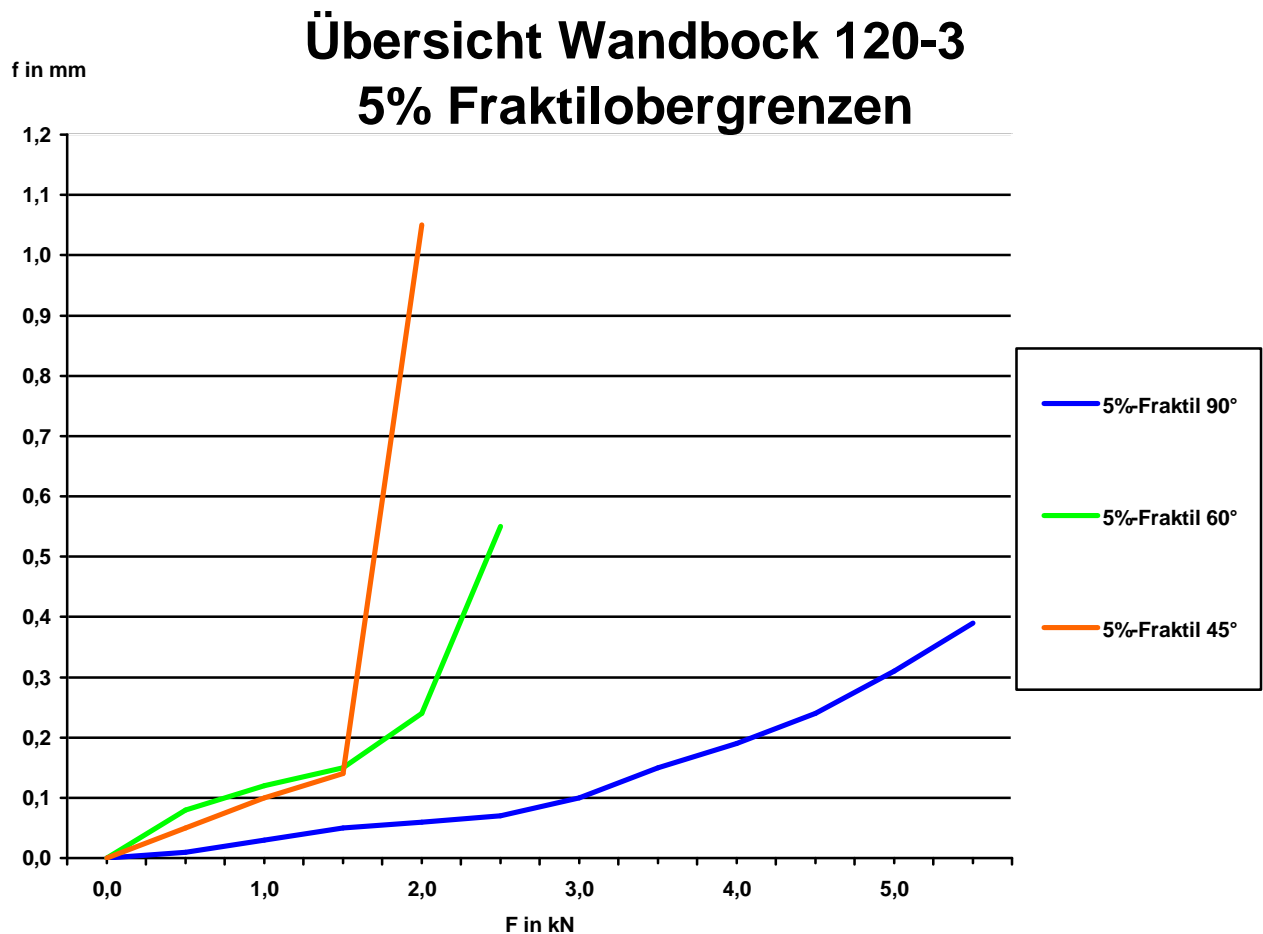


Abbildung 95: Übersichtsdiagramm 5%-Fraktilgrenzen beim Wandbock 120-3

Für die Ermittlung der Tragfähigkeit müssen die Ergebnisse mit einem Teilsicherheitsfaktor von $\gamma_m = 3,0$ versehen werden.

Beispiel:

Es wird anhand dieses Diagramms festgelegt, dass der Wandbock 120-3 im Winkel von 45° eine Last von 1,5kN abtragen kann. Er verformt sich dabei im schlimmsten Fall ca. 0,13mm. Bei der Ermittlung der Tragfähigkeit wird die charakteristische Kraft $F=1,5\text{kN}$ mit dem Teilsicherheitsfaktor $\gamma_m = 3,0$ dividiert. Als Bemessungswert für die statische Berechnung kann $F_d=0,5\text{kN}$ angesetzt werden.

Bei den Verformungen der Wandböcke ist zu beachten, dass diese in den Versuchen nicht genauer ermittelt werden konnten. Ein Grund dafür war die dafür verwendete Messtechnik und deren Anordnung. Somit ist festzuhalten, dass die Wandböcke noch Tragfähigkeitsreserven haben, die allerdings im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht weiter ermittelt werden konnten.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 1999-1; Eurocode 9
- [2] DIN 18516-1(2010-06); Standsicherheitsnachweise
- [3] Schneider; Bautabellen für Ingenieure
- [4] Link, Michael; Finite Elemente in der Statik und Dynamik, 3.Auflage
- [5] Wagner, Peter; Handbuch für Entwurf, Konstruktion und Montage von vorgehängten, hinterlüfteten Fassaden (VHF)
- [6] Dlubal, Programmbeschreibung RFEM4
- [7] Owen, Handbook of statistical tables

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Frau Dipl. Ing. Grit Gutschick und bei Herrn Prof. Dr. Ing. Torsten Laufs für die gemeinsame Ausarbeitung der sehr interessanten Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Dipl. Ing. Horst Hobler für seine fachliche und persönliche Unterstützung als Laborbetreuer bedanken.

Mein Dank geht auch an die Firma Huster Sondermaschinen und Metallbau GmbH & Co. KG sowie an die Firma MAB Metall- und Anlagenbau GmbH Chemnitz für die Bereitstellung von Materialien und Schweißarbeiten an der Prüfstandkonstruktion.

Anhang

Der Bachelorarbeit ist eine Daten-CD beigelegt.

Inhalt: - Bachelorarbeit als PDF-Datei

- RFEM4 - Dateien aller Finiten Element Modelle
- Bedienungsanleitung Spider 8
- Originalmesswerte aus Spider 8
- alle Umrechnungs- und Durchschnittstabellen
- Übersichtsdiagramme 5% Fraktilgrenze aller Wandböcke
- Bilddateien